



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**PORUCHY SOUKOLÍ**

GEAR FAILURES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Josef Paška**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Kamil Řehák, Ph.D.**

**BRNO 2019**

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Josef Paška**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Kamil Řehák, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Poruchy soukolí

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Porucha soukolí je stav, kdy soukolí nemůže vykonávat úkon, pro jaký bylo navrženo. Jednotlivé poruchy jsou značně odlišné od nadměrného opotřebení až po porušení zubu. Na základě rešerše soustředit poznatky o poruchách soukolí včetně možnosti jejich určení na základě dat z měření.

### Cíle bakalářské práce:

Provedení rešerše za účelem:

- vytvoření přehledu jednotlivých typů ozubení,
- vytvoření přehledu jednotlivých poruch poškození včetně popisu projevu, příčiny a možné nápravy.

Provedení měření včetně následného zpracování dat.

### Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward, MISCHKE, Charles R. a BUDYNAS, Richard G. (ed.). Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTUM, 2010. 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

LESTER, E. A. Systematic analysis of gear failure. Ohio, 1993. 227s. ISBN 0-87170-200-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá ozubenými soukolími. V první části je detailně rozebráno rozdělení jednotlivých typů ozubení. Ve druhé části je popsán podrobný přehled možných poruch ozubení, včetně jejich příčin a projevů, případně jak je možné docílit jejich nápravy. Závěrečná část práce je věnována technickému experimentu, který má za cíl provést vibrodiagnostiku převodového ústrojí, jež je testováno na zkušebním stavu. Naměřená data byla následně zpracována pomocí komerčně dostupného softwaru, přičemž vibrace převodovky byly zaznamenány, nejprve na začátku měření, kdy ozubení bylo bez poškození a následně na konci životnostního testu, kdy bylo známo, že jde o stav s poškozenými zuby.

## KLÍČOVÁ SLOVA

ozubení, porucha, ozubené kolo, vibrace

## ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on gears. The first part of the thesis informs about the sorting of each type of gears. In the second part, there is a detailed overview of possible gears failures, including their causes, manifestation and their potential solutions for correction. The last part of the thesis handles technical experiment, which aims to performance of vibrodiagnostic of the gear system, tested on the test state. Measured data were subsequently processed by commercially accessible software, where the vibrations of transmission were recorded – firstly at the beginning of measuring when the gears were without damage and afterwards at the end of testing, when the state of damaged teeth was detected.

## KEYWORDS

gearing, failure, gear, vibration

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAŠKA, J. *Poruchy soukolí*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Kamil Řehák.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Kamila Řeháka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 23. května 2019

.....

Josef Paška

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Kamilu Řehákovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

## OBSAH

Úvod .....	10
1 Rozdělení ozubených soukolí .....	11
1.1 Dělení ozubených soukolí .....	12
1.2 Čelní ozubené soukolí .....	12
1.2.1 Tvar zubů .....	12
1.2.2 Základní názvosloví .....	14
1.2.3 Modifikace tvarů zubů .....	16
1.2.4 Popis záběru .....	17
1.2.5 Rozdělení čelních ozubených soukolí .....	18
1.2.6 Další typy čelních soukolí .....	19
1.3 Kuželová ozubená soukolí .....	20
1.3.1 Rozdělení podle tvaru věnců kuželových kol .....	20
1.3.2 Rozdělení kuželových kol podle zakřivení zubu .....	22
1.4 Šroubová soukolí .....	23
1.4.1 Šneková soukolí .....	24
1.4.2 Hypoidní soukolí .....	25
1.4.3 Spiroidní soukolí .....	25
1.5 Srovnání jednotlivých typů soukolí .....	25
2 Typy poruch .....	27
2.1 Lom zubu .....	27
2.1.1 Únavový lom zubu .....	27
2.1.2 Křehký lom zubu .....	28
2.2 Únavové vydrolování .....	29
2.2.1 Omezené vydrolování .....	29
2.2.2 Progresivní vydrolování .....	29
2.2.3 Mikro – pitting .....	30
2.3 Otěr zubu .....	30
2.3.1 Abrazivní otěr .....	30
2.3.2 Adhezivní otěr .....	31
2.3.3 Chemický otěr .....	32
2.4 Plastická deformace .....	32
2.4.1 Cold flow .....	33
2.4.2 Rippling .....	33
2.4.3 Ridging .....	33
2.5 Trhliny .....	33



2.6	Opravy ozubení.....	33
3	Provedení technického experimentu.....	35
3.1	Měření vibrací.....	35
3.2	Vyhodnocení vibrací.....	36
3.2.1	Schéma převodovky .....	37
3.2.2	Rozbor výsledků měření vibrací před poruchou.....	38
3.2.3	Rozbor výsledků měření vibrací při poruše.....	40
3.2.4	Porovnání výsledků měření vibrací .....	41
	Závěr.....	42

## ÚVOD

Ozubená soukolí se používají ve většině typů strojů a řadí se mezi nejběžnější součásti. S ozubenými soukolími je spojena i dlouhá historie, kdy o nejstarších ozubených soukolích jsou zmínky více než tři tisíce let staré a jejich problematikou se zabývali nejchytřejší lidé svých dob. V rámci vývoje tak byly navrženy další typy ozubených soukolí, která byla dále zpřesňována, k čemuž přispěla i zvyšující se úroveň strojírenství.

V současné době se stala z problematiky ozubených soukolí velmi složitá a náročná věda, neboť dosahovat neustálého zlepšování parametrů není už tak lehké jako dříve. Největší nároky se kladou na tichý chod, stále menší zástavbový rozměr a hmotnost, a také samozřejmě na nižší cenu. Na vývoji ozubených kol pracuje mnoho vysokých škol, ale i soukromých firem, které si sebemenší posun v této problematice chrání, a je to pro ně velmi cenné know-how.

Ozubené soukolí přenáší mechanickou energii pomocí dvou i více ozubených kol z hnacího stroje na stroj hnaný. Hlavními výhodami oproti ostatním typům převodů (elektrické, hydraulické a pneumatické) jsou vysoká účinnost, konstantní převodový poměr a relativně malé rozměry. Pomocí ozubených soukolí lze přenášet vysoké momenty a zatížení, kvůli tomu patří k extrémně namáhaným součástem a musí se dbát na správné konstrukční řešení. Při návrhu je nutné počítat s okolními vlivy, které mohou negativně ovlivnit chod soukolí a mohou vést až k poškození. Poškození soukolí lze způsobit i při špatném sestavení, nevhodnou manipulací a obsluhou. Existuje mnoho druhů poruch soukolí a je velmi obtížné navrhnout soukolí, které bude splňovat veškeré požadavky zákazníka, jež se neustále zvyšují a současně požadavek na snižující se cenu finálního výrobku. Z tohoto důvodu je možné se v technické praxi setkat s poruchami. V závislosti na charakteru poruchy je možné je rozdělit na poruchy, které se při dalším provozu přestanou šířit, nebrání dalšímu provozu a je možné je v některých případech akceptovat, a na poruchy, které se mohou šířit do naprostého zničení převodu a je tedy nutné se jim vyvarovat.

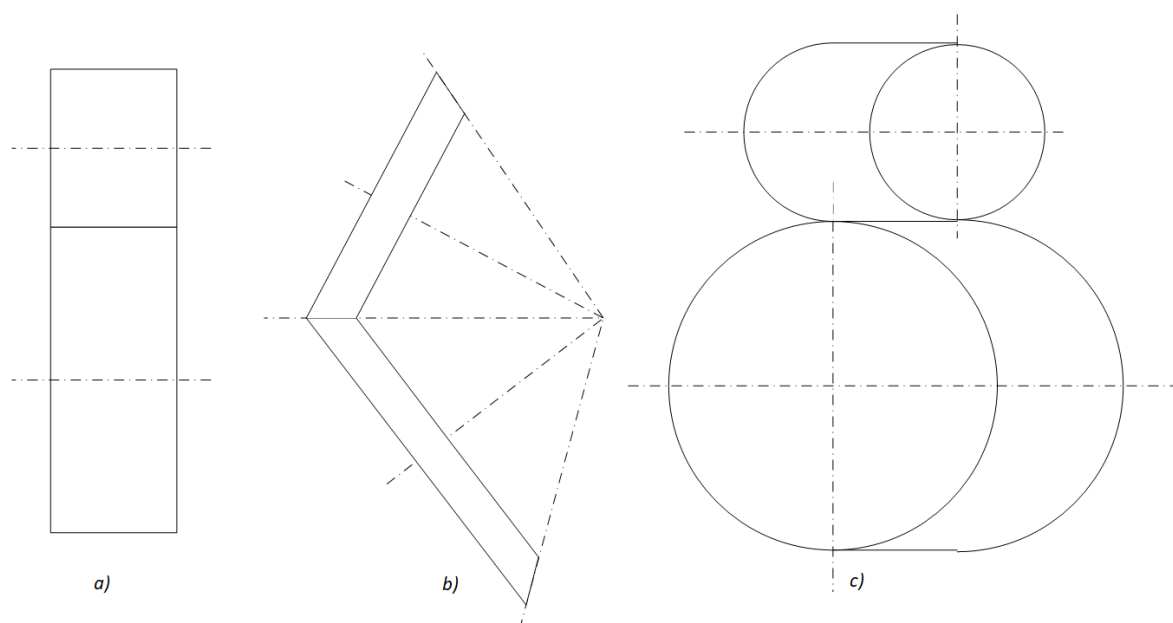
Technické experimenty jsou nezbytné při konstruování strojních součástí. Při navrhování ozubeného soukolí se používá vibrodiagnostika, anebo popřípadě měření vibroakustických jevů, ale i další. Výsledky těchto experimentů lze použít ke zlepšení již existujících numerických modelů a k zefektivnění výrobního procesu.

# 1 ROZDĚLENÍ OZUBENÝCH SOUKOLÍ

Ozubené převody slouží k přenosu mechanické energie a vytvoření kinematické a silové vazby mezi dvěma hřídeli s požadovanými otáčivými účinky (úhlová rychlost, točivý moment). Tyto hřídele jsou opatřeny ozubenými koly, které vytváří daný ozubený převod. Ozubená kola se dělí na hnané a hnací. Hnací kolo, které bývá většinou menší se označuje jako pastorek, hnané kolo se označuje jako kolo. [5]

Volbu ozubených kol musíme uzpůsobit vzájemné poloze hřídelů. Hřídele mohou být vzájemně rovnoběžné, různoběžné anebo mimoběžné, jak lze vidět na Obr. 1.1. Pro přenos mechanické energie mezi rovnoběžnými hřídeli se používají čelní ozubená kola, která mají tvar válců. Pro přenos mechanické energie mezi různoběžnými hřídeli se používají kuželová ozubená kola, která mají tvar komolých kuželů. Pro přenos mechanické energie mezi mimoběžnými hřídeli se používají šroubová ozubená kola, která mají tvar válců se šroubovitě vinutými zuby. [5]

Mezi přednosti ozubených mechanismů patří jejich spolehlivost, životnost a vysoká mechanická účinnost, schopnost přenést vysoké převodové poměry a výkony při velké obvodové rychlosti. Jsou využívány pro jejich malé rozměry ve srovnání s ostatními mechanismy a nenáročnost na údržbu. Oproti tomu jejich nevýhody se řadí zejména jejich složitá a drahá výroba a náročné konstrukční řešení. Při nesprávném uložení vznikají nežádoucí vibrace a hluk. Při návrhu je nutné vzít v úvahu mnoho nutných podmínek, například při volbě převodového poměru se musí uvažovat, že počet zubů je celé číslo. [4]



Obr. 1.1 Druhy ozubených soukolí – a) čelní, b) kuželové, c) šroubové

## 1.1 DĚLENÍ OZUBENÝCH SOUKOLÍ

Ozubená soukolí je možné dělit podle následujících kritérií:

- a) Podle obvodové rychlosti soukolí:
  - Pomaloběžná – soukolí s obvodovou rychlostí  $< 3$  m/s
  - Se střední rychlostí – soukolí s obvodovou rychlostí v rozmezí 3-15 m/s
  - Rychloběžná – soukolí s obvodovou rychlostí  $> 15$  m/s
- b) Podle vzájemné polohy os:
  - Rovnoběžné osy – valivá přímá soukolí se zuby
    - Přímými
    - Šikmými
    - Šípovými
  - Různoběžné osy – kuželová soukolí se zuby
    - Přímými
    - Šikmými
    - Zakřivenými
  - Mimoběžné osy
    - Šroubová soukolí
    - Šneková soukolí
    - Hypoidní soukolí
    - Spiroidní soukolí
- c) Podle vzájemné polohy spolu zabírajících kol
  - Vnitřní soukolí
  - Vnější soukolí
  - Ozubený hřeben a pastorek
- d) Podle velikosti převodového poměru
  - Převody dorychla ( $i < 1$ )
  - Převody dopomala ( $i > 1$ )[9]

## 1.2 ČELNÍ OZUBENÉ SOUKOLÍ

Čelní ozubené soukolí se řadí mezi nejjednodušší typy ozubených soukolí. Slouží k vytvoření kinematické a silové vazby mezi rovnoběžnými hřídeli. Díky svému jednoduchému tvaru jsou schopny dosahovat velké účinnosti. [3]

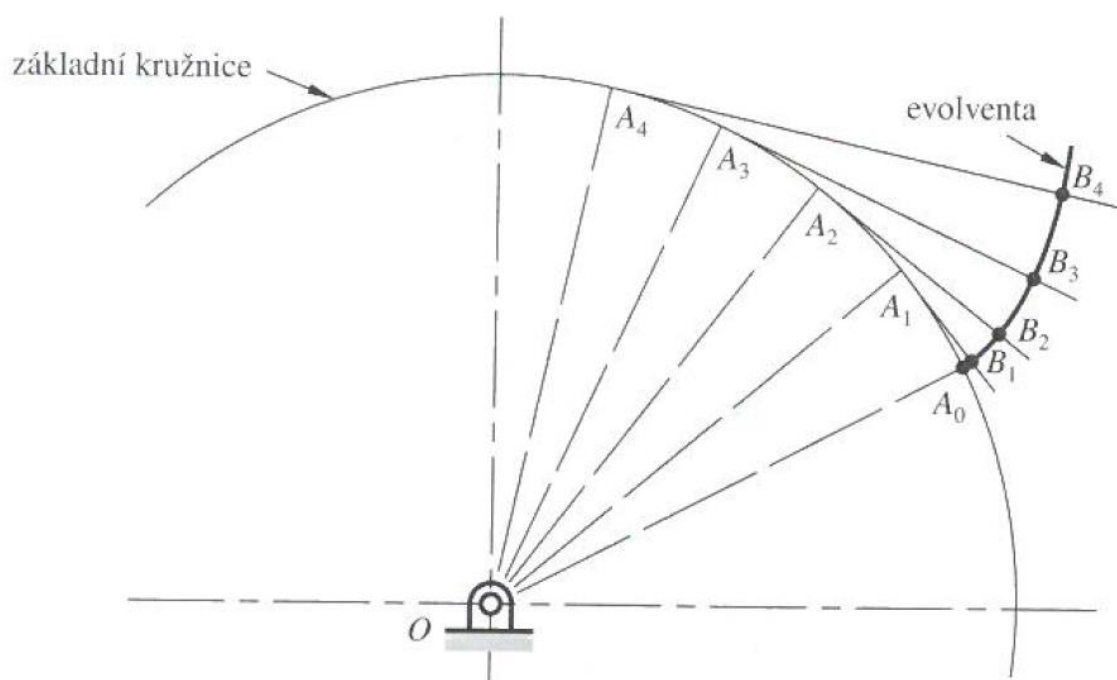
Čelní ozubená kola se mohou vyrábět mnoha způsoby. Podle požadavků na dané ozubené čelní kolo se výroba může provádět odléváním (do písku, metodou vytavitelných modelů, pomocí odstředivého lití), tvářením (za tepla i studena), slinováním (pomocí práškové metalurgie), obráběním (frézování dělicím způsobem, obrázení odvalovacím způsobem). [11]

### 1.2.1 TVAR ZUBŮ

Většina ozubených kol má evolventní tvar zubů. Jiné tvary zubů se používají jen zřídka kvůli složité výrobě a neefektivnosti.

## EVOLVENTNÍ TVAR ZUBU

Evolventa vzniká odvalováním bodu ležícího na přímce po kružnici, jak lze vidět na Obr. 1.2. Velkou výhodou je, že u evolventních profilů změna osové vzdálenosti mezi hřídeli nemá zásadní vliv na změnu velikosti úhlové rychlosti. Při změně osové vzdálenosti dochází ke změně valivé kružnice (kružnice, po které se odvaluje bod dotyku), to má za následek změnu úhlu záběru. Když dochází ke zvětšení osové vzdálenosti, zvětšuje se úhel záběru a zkracuje se délka záběru. Záběr je ale stále plynulý a trvalý. Dalšími výhodami evolventního profilu jsou konstantní směry sil v ozubení a pro jeho výrobu je potřeba pouze jednoduchý nástroj (ozubený hřeben). Nevýhodou představuje nezbytné podřezání při malém počtu zubů. Velký důraz je kladen i na přesné a tuhé uložení hřídele. Dále lze evolventu sestavit jako obálku vytvořenou přímkovým úsekem anebo jinou evolventou. [1][2] [4][11]



Obr. 1.2 Konstrukce evolventy [2]

Z výrobních důvodů není možné docílit ideálního stavu, kdy by měl celý zub evolventní tvar. Evolventní tvar má zub pouze od hlavové kružnice po kružnici základní. Od základní kružnice po patní kružnici má zub tvar podle výrobního nástroje.

## DALŠÍ TVARY ZUBŮ

U převodu realizovaného pomocí ozubeného hřebene a kola se využívá cykloidní tvar zubu. Cykloida je křivka, která vzniká při valení kružnice po přímce, sledováním právě jednoho bodu na kružnici. Použitím cykloidního tvaru získá kořen zubu větší plochu a je tak odolnější proti opotřebení. Při výrobě je nutno počítat s vyššími finančními náklady a ve srovnání s evolventním tvarem zubu i náročností. Oproti evolventnímu ozubení se mění i úhel záběru, kdy na začátku a na konci má maximální hodnotu, a ve valivém bodě je nulový. [11]

Speciálním typem ozubeného převodu je také Wilhaber-Novikovo soukolí, jeho zuby mají kruhový čelní profil. Platí, že zuby pastorku a kola jsou sdružené. Styk bočních ploch

je teoreticky bodový, z toho plyne, že výška zubu by mohla být teoreticky nulová. Skutečné zuby mají malou výšku. Soukolí Wilhaber-Novikov lze použít u kol, které mají osy rovnoběžné, různoběžné i mimoběžné. Hlavní výhodou představuje schopnost tohoto soukolí přenést vysoké zatížení, při jeho relativně malém rozměru. Mezi další výhody patří vysoká mechanická účinnost a životnost. Oproti tomu za nevýhody se považuje citlivost na správné nastavení osové vzdálenosti, při vyšších otáčkách značná hlučnost, velké nároky na tuhost uložení a přesnost výroby. [4]

### 1.2.2 ZÁKLADNÍ NÁZVOSLOVÍ

Ozubené kolo se skládá z tělesa ozubeného kola a z ozubení. Zub ozubeného kola je geometricky určen hlavovou a patní kružnicí a plochou boků zubu. Hlavová a patní kružnice jsou souosé. Důležitá je také roztečná kružnice, která je také souosá s hlavou i patní kružnicí. Z roztečné kružnice přímo vychází rozteč zubu. Podle rozteče se určují základní prvky a rozměry ozubeného kola. Roztečná kružnice dělí zub na hlavu a patu. Za hlavu zubu se považuje část zubu mezi hlavovou a roztečnou kružnicí. Za patu zubu se považuje část zubu mezi roztečnou a patní kružnicí. Vzdálenost mezi dvěma nejbližšími body ležících na roztečné kružnici na sousedících zubech se nazývá zubová mezera, viz Obr. 1.3. Rozteč zubů  $p$  je vzdálenost mezi dvěma krajními body sousedních zubů, ležících na roztečné kružnici. Rozteče dvou spolu zabírajících kol musí být stejné  $p=p_1=p_2$ . [2]

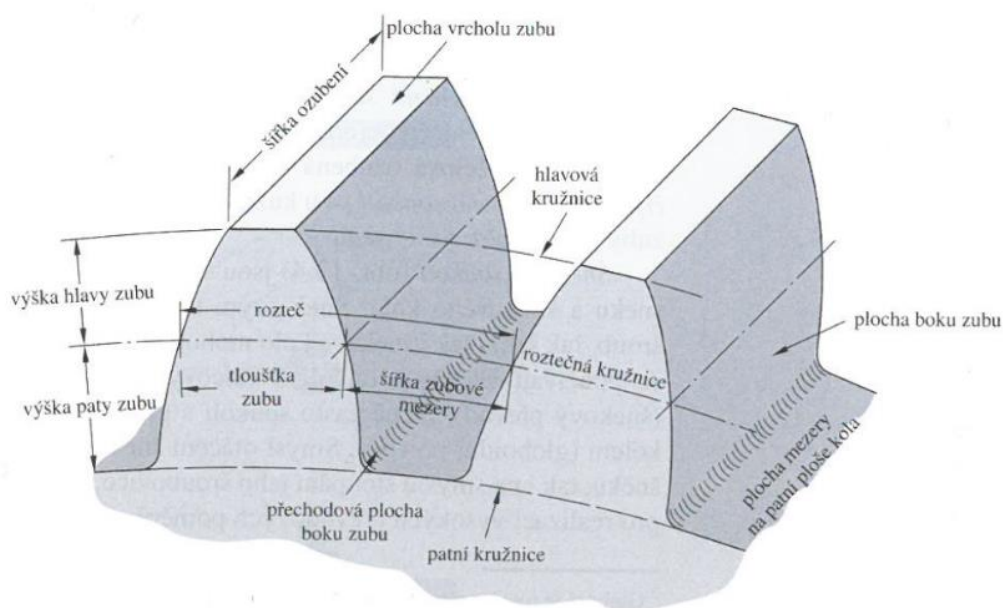
$$p = \frac{\pi d}{z} = \pi m, \quad (1)$$

kde  $p$  je rozteč,  
 $d$  je průměr roztečné kružnice,  
 $z$  je počet zubů,  
 $m$  je modul ozubení.

Pro určení převodového poměru  $i$  se vychází z níže uvedených veličin. Anebo případně pro jejich určení se používá převodové číslo. Pro pastorek mají veličiny index 1, pro kolo index 2.

$$\frac{z_2}{z_1} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = i, \quad (2)$$

kde  $n_1$  je frekvence otáčení pastorku,  
 $n_2$  je frekvence otáčení kola,  
 $\omega_1$  je úhlová rychlost pastorku,  
 $\omega_2$  je úhlová rychlost kola,  
 $z_1$  je počet zubů pastorku,  
 $z_2$  je počet zubů kola,  
 $d_1$  je průměr roztečné kružnice pastorku,  
 $d_2$  je průměr roztečné kružnice kola,  
 $i$  je převodový poměr.



Obr. 1.3 Základní názvosloví ozubení [2]

Jako základní charakteristiku tvaru zubu se považuje modul zubu. Z modulu vycházejí další rozměry ozubení.

$$m = \frac{p}{\pi} \quad (3)$$

$$h_a = m \quad (4)$$

$$h_f = h_a + c = m + 0,25m = 1,25m \quad (5)$$

$$h = h_a + h_f = 2,25m \quad (6)$$

$$d = m \cdot z \quad (7)$$

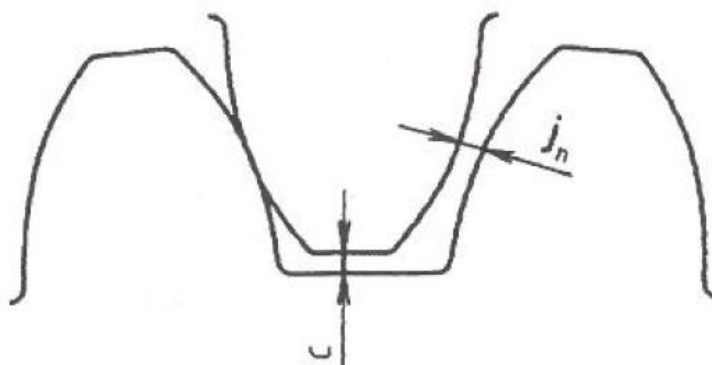
$$d_a = d + 2h_a = m \cdot z + 2 \cdot m = m(z + 2) \quad (8)$$

$$d_f = d - 2h_f = m(z - 2,5), \quad (9)$$

kde  $h_a$  je výška hlavy zubu,  
 $h_f$  je výška paty zubu,  
 $c$  je hlavová vůle,  
 $h$  je výška zubu,  
 $d_a$  je průměr hlavové kružnice,  
 $d_f$  je průměr patní kružnice.

Mezi další dva parametry, které se určují, patří hlavová vůle  $c$  a boční vůle  $j_n$ , viz Obr. 1.4. Hlavová vůle představuje nejmenší možnou vzdálenost mezi patní kružnicí jednoho kola a hlavovou kružnicí druhého kola. Její velikost bývá v intervalu  $c = (0,167 \text{ až } 0,35)m$ . Boční

vůle je nutná kvůli nepřesnostem při výrobě a při montáži, anebo v případě tepelné dilatace při chodu. [5]



Obr. 1.4 hlavová vůle  $c$  a boční vůle  $j_n$  [4]

### 1.2.3 MODIFIKACE TVARŮ ZUBŮ

Reálný tvar zubů evolventního ozubení se od teoretického tvaru samozřejmě liší. Rozdíly způsobují technologické a provozní důvody. Technologické důvody souvisejí přímo s výrobou ozubení, například s přesností daného způsobu výroby ozubení. Mezi provozní důvody patří vytvoření hlavové a boční vůle, které jsou nezbytné pro plynulý chod. [11]

Pro splnění provozních požadavků je nutné vytvořit další úpravy teoretického tvaru zubu, tyto úpravy se nazývají modifikace tvarů zubů. Obecně se modifikace používají pro kompenzaci nepříznivých účinků záběru ozubených kol. Modifikace se dělí na modifikace výškové a podélné. Mezi modifikace tvaru zubu lze také zařadit podřezání paty zubu a sražení hrany na hlavě zubu. Podřezáním paty zubu se usnadňují dokončující operace jako broušení či ševingování a dochází také ke snížení vrubových účinků. S podřezáním je nutné počítat při pevnostním návrhu, protože dochází k oslabení paty zubu, kde se zpravidla nachází kritické místo zubu. Sražením hrany se zamezuje poškození hran před tepelnou úpravou a vzniku případných zbytkových namáhání a také se provádí pro odstranění otřepů. [11]

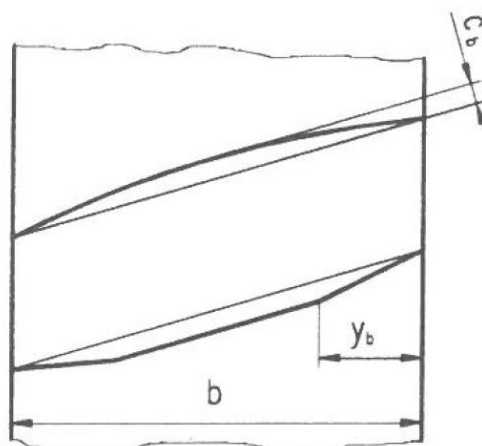
### VÝŠKOVÁ MODIFIKACE

Výšková modifikace se provádí hlavně kvůli velké tuhosti zubu a změně tuhosti, způsobené změnou počtu zubů v záběru. Výškovou modifikací se může upravit tvar evolventy nebo úhel záběru. Modifikací tvaru evolventy se odstraňují nepřesnosti profilu, rozteče a deformace zubu. Změnou úhlu záběru se eliminuje deformace zubů, změna materiálu vlivem teploty a popřípadě i deformace hřídelů. Při dostatečné modifikaci paty i hlavy zubu stačí modifikovat pouze jedno z kol. [11]



### PODÉLNÁ MODIFIKACE

Podélná modifikace neboli modifikace boční křivky se aplikuje pro eliminaci deformace způsobené zatížením od ložisek, hřídelů, těles kol a skříní. U úzkých kol se modifikuje zpravidla celá boční křivka a modifikace má spojitý průběh. U širokých kol se modifikují pouze okraje boční křivky většinou symetricky, jak lze vidět na Obr. 1.5. Dále se u šikmých zubů může využít modifikace úhlová. Slouží pro eliminaci deformací od zatížení. Úhlová modifikace spočívá v úpravě úhlu stoupání šroubovice. [11]



Obr. 1.5 Druhy podélné modifikace zubu [10]

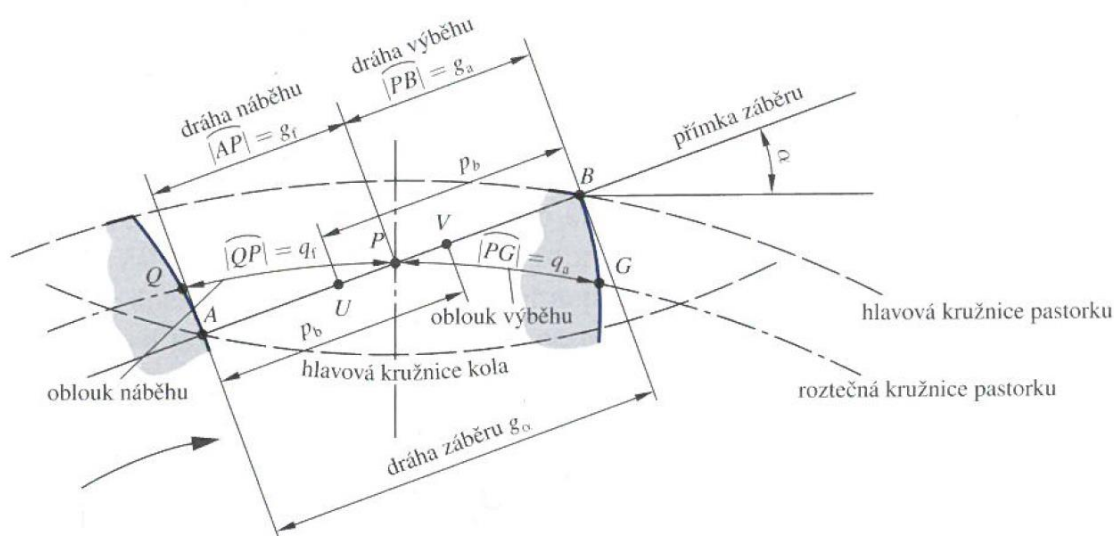
#### 1.2.4 POPIS ZÁBĚRU

Dráhu záběru určují průsečíky A, B hlavových kružnic kola i pastorku s přímkou záběru. Záběr začíná je v bodě A, končí v bodě B. Oblouk záběru tvoří část roztečné kružnice, kde profily zubu procházející body A a B protínají roztečnou kružnici. Oblouk na Obr. 1.6 tvoří body Q a G. Délka oblouku záběru  $q_\alpha$  vyjadřuje součet oblouku náběhu  $q_f$  a oblouku výběhu  $q_a$ . [2]

Platí:

$$q_\alpha = |\widehat{QG}| = |\widehat{QP}| + |\widehat{PG}| = q_f + q_a \quad (10)$$

Když platí  $q_\alpha = p$ , tak v záběru je trvale jen právě jeden zub. Tento předpoklad by však v praxi neuspěl, protože vlivem nepřesností při montáži a výrobě by se mohlo stát, že v jednom okamžiku nebude v záběru ani jeden zub. Proto je zpravidla délka oblouku větší než rozteč např.  $q_\alpha = 1,2p$ . Při tomto předpokladu platí, že v záběru jsou střídavě jeden nebo dva zuby pastorku, respektive kola. Bod P je bod, kde se dráha záběru protíná s roztečnou kružnicí pastorku i kola. [2]



Obr. 1.6 Popis záběru [2]

### 1.2.5 ROZDĚLENÍ ČELNÍCH OZUBENÝCH SOUKOLÍ

Dělení čelních ozubených soukolí provádíme podle tvaru jejich boční křivky zubu na čelní ozubená kola s přímými zuby, čelní ozubená kola se šikmými zuby a na čelní ozubená kola se šípovými zuby, viz Obr. 1.7. [2]

#### ČELNÍ OZUBENÁ SOUKOLÍ S PŘÍMÝMI ZUBY

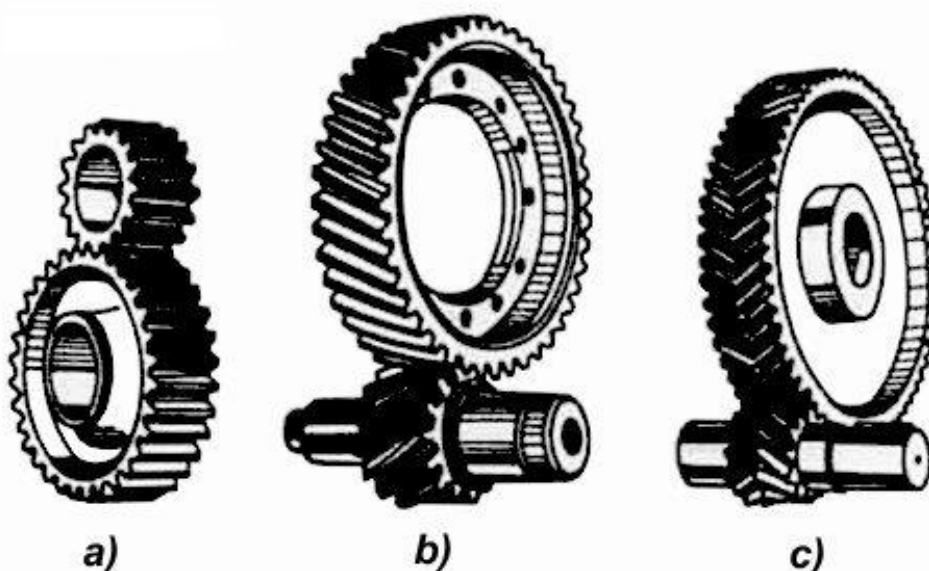
Jedná se o nejběžnější a nejjednodušší typ čelních ozubení. Slouží pro vytvoření kinematických a silových vazeb pouze mezi rovnoběžnými hřídeli. Jejich boční křivka zubu leží rovnoběžně s osou ozubeného kola. Nejčastěji se pro čelní ozubená soukolí s přímými zuby používá evolventní profil, méně často i profil cykloidní. Mohou být použita pro jakékoli obvodové rychlosti, ale při vysokých rychlostech se vyznačují velkou hlučností. Při záběru vzniká pouze radiální síla, kterou zachycují ložiska. Výhodou představuje také jejich jednoduchá výroba a údržba. Pro to, že jsou poměrně jednoduché na popis, slouží k odvození teorie rovinného ozubení (soubor základních poznatků o geometrii, kinematice a záběrových vlastnostech rovinných profilů). [3] [9]

#### ČELNÍ OZUBENÁ SOUKOLÍ SE ŠIKMÝMI ZUBY

Jejich boční křivky tvoří šroubovice. Díky tomu jsou schopny přenést vyšší zatížení než čelní ozubená soukolí s přímými zuby stejných rozměrů. Používají se pro rychloběžné převody, kvůli svému tichému vstupu a výstupu do záběru a ze záběru, ale i samotnému tichému a klidnému chodu a menším vibracím. Nevyskytuje se zde takové opotřebení jako u soukolí s přímými zuby, protože se zatížení rozděluje mezi více zubů. Za hlavní nevýhodu se považuje vznikající axiální síla, která namáhá ložiska. Při návrhu je tedy nutné kromě radiálních ložisek použít i axiální ložiska. [2] [9]

### ČELNÍ OZUBENÁ SOUKOLÍ SE ŠÍPOVÝMI ZUBY

Speciální případ ozubení se šikmými zuby představuje šípové ozubení. Jedna polovina šířky zubu má úhel sklonu pravý, druhá polovina má sklon s levým úhlem o stejné velikosti. Vznikají dvě axiální síly se stejnou velikostí, ale s opačným směrem, které se tedy navzájem ruší. Mezi výhody patří tichý chod a klidný vstup a výstup ze záběru a do záběru. Za nevýhody se považuje obtížnější výroba a velká šířka kola. [1]



Obr. 1.7 Čelní ozubená kolo a) s přímými zuby b) se šikmými zuby c) se šípovými zuby [12]

### 1.2.6 DALŠÍ TYPY ČELNÍCH SOUKOLÍ

#### OZUBENÝ HŘEBEN A PASTOREK

Ozubený hřeben je čelní ozubené kolo s nekonečně velkým poloměrem zakřivení. Používá se pro změnu točivého momentu na lineární sílu, respektive změnu rotačního pohybu na pohyb translační a naopak. Spojení ozubeného hřebene a pastorku se používá například v automobilech pro změnu rotačního momentu volantu na translační pohyb přední osy. [8] [9]

#### SOUKOLÍ S VNITŘNÍM ZÁBĚREM

Soukolí s vnitřním záběrem se používá pro vytvoření silové a kinematické vazby mezi dvěma rovnoběžnými hřídeli. Díky tomu, že větší kolo má ozubení na vnitřní straně věnce, tak soukolí má menší zástavbový rozměr. Na rozdíl od většiny soukolí mají pastorek i kolo shodný směr otáčení. Využívá se pro přenos velkých zatížení a rychlostí, kde není vyžadována velká přesnost záběru, anebo pro soukolí s potřebou velkého převodového čísla. Používá se v automobilovém průmyslu, například v automatických převodovkách. [8]

## PLANETOVÝ MECHANISMUS

Planetové mechanismy tvoří jedno centrální kolo, jeden či několik satelitů, unašeč a korunové kolo. Osa korunového kola a osa centrálního kola jsou totožné s centrální osou převodu. Korunové kolo je na pevně připojeno k rámu a má vnitřní ozubení. Unašeč spojuje centrální kolo a satelit, koná planetový pohyb vůči rámu a otáčí se kolem centrální osy převodu. Satelit koná obecný rovinný pohyb a je unášen unašečem. Planetový mechanismus má jeden stupeň volnosti. Speciální případ planetového mechanismu reprezentuje diferenciální převod, v němž se nachází pohyblivé i korunové kolo. Diferenciální převod disponuje dvěma stupni volnosti.[2]



*Obr. 1.8 Ozubený převod realizovaný ozubeným hřebenem a kolem (vlevo), soukolí s vnitřním záběrem (uprostřed), planetový převod (vpravo) [8] [12]*

## 1.3 KUŽELOVÁ OZUBENÁ SOUKOLÍ

Kuželová ozubená soukolí slouží k vytvoření kinematické a silové vazby mezi různoběžnými hřídeli, nejvíce pro osový úhel  $90^\circ$ . Kuželová kola s přímými zuby se využívají pro méně hlučné převody a nižší obvodové rychlosti. Pro vyšší rychlosti a větší zatížení se používají kuželová soukolí se zuby zakřivenými anebo šikmými. Jsou méně citlivé na výrobní nepřesnosti a deformace. Mají tišší, plynulejší chod a vyšší pevnost než čelní soukolí. Ale pro jejich výrobu jsou potřeba finančně nákladnějších jednoúčelových strojů. [4]

Tento typ soukolí se dá vyrábět pomocí odlévání, frézování, obrázení, protahování. Ale pro dosažení největší přesnosti je vhodné použít frézování odvalovacím způsobem. Výroba probíhající tímto způsobem se vyznačuje finanční náročností a vyžaduje speciální nástroje a stroje. Dále se musí klást velký důraz na konstrukční řešení oproti kolům čelním. [1]

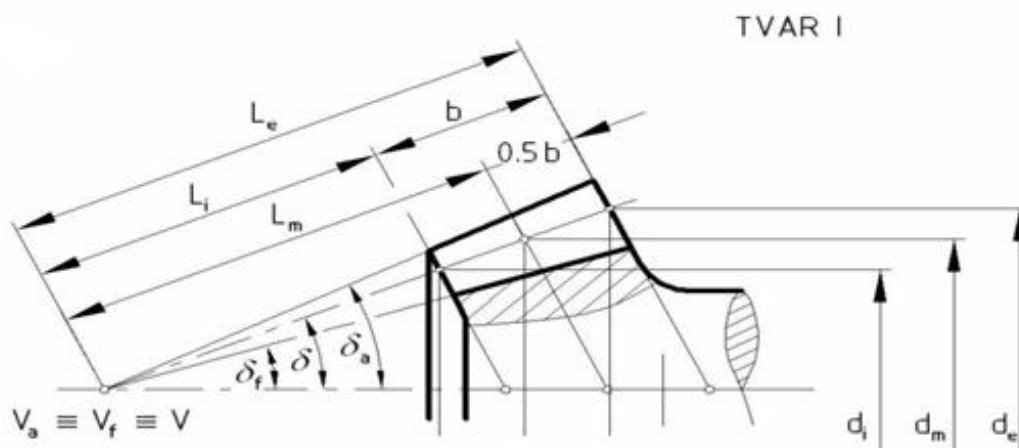
### 1.3.1 ROZDĚLENÍ PODLE TVARU VĚNCŮ KUŽELOVÝCH KOL

Geometrický základ tvoří dva komolé kužele, patní a hlavový. Mezi nimi je kužel roztečný. Rozdělení kuželových kol se provádí podle vzájemné polohy hlavové, roztečné a patní kuželové plochy.

#### TVAR I

Na Obr. 1.9 lze vidět, že pro tento případ platí, že všechny tři kuželové plochy, hlavová ( $V_a$ ), roztečná ( $V$ ) a patní ( $V_f$ ) mají společný vrchol. Z toho plyne, že příčné rozměry zubů rostou

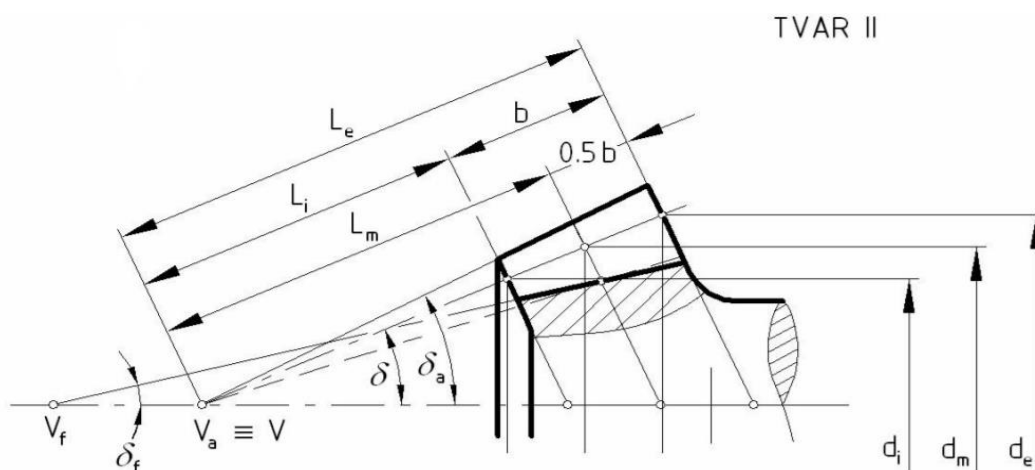
úměrně s délkou od vrcholu. Tento tvar věnce se používá pro kola přímé, šikmé a některé kruhově zakřivené. [4]



Obr. 1.9 Tvar I věnce kuželového kola [14]

## TVAR II

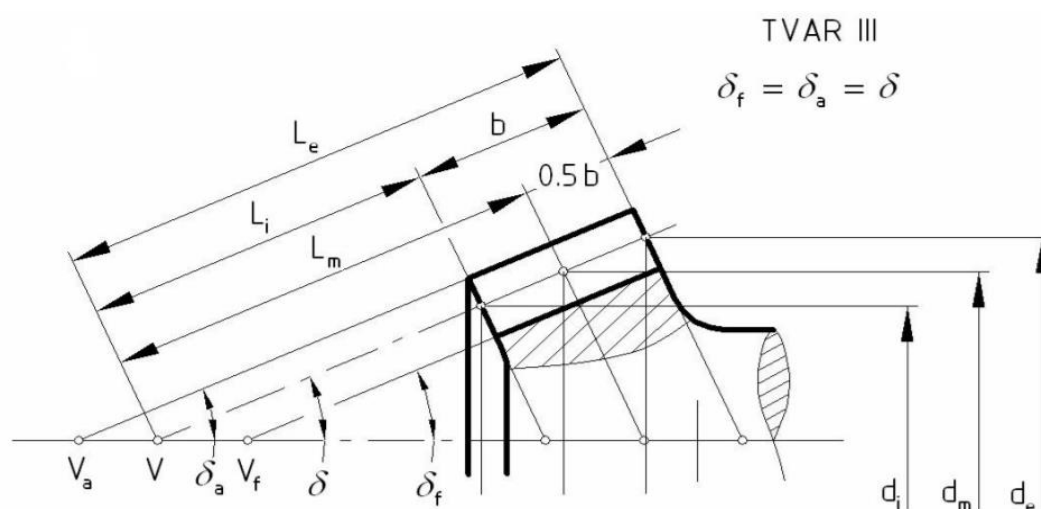
Posunutím vrcholu patního kuželové plochy dostáváme konstantní šířku zubové mezery. Vrcholy pro hlavovou a roztečnou kuželovou plochu zůstávají v jednom bodě, aby šířka zubu na roztečné kuželové ploše narůstala úměrně s rostoucí délkou od vrcholu. Tento tvar se používá pro kola se zuby kruhově zakřivenými. Viz Obr. 1.10. [4]



Obr. 1.10 Tvar II věnce kuželového kola [14]

## TVAR III

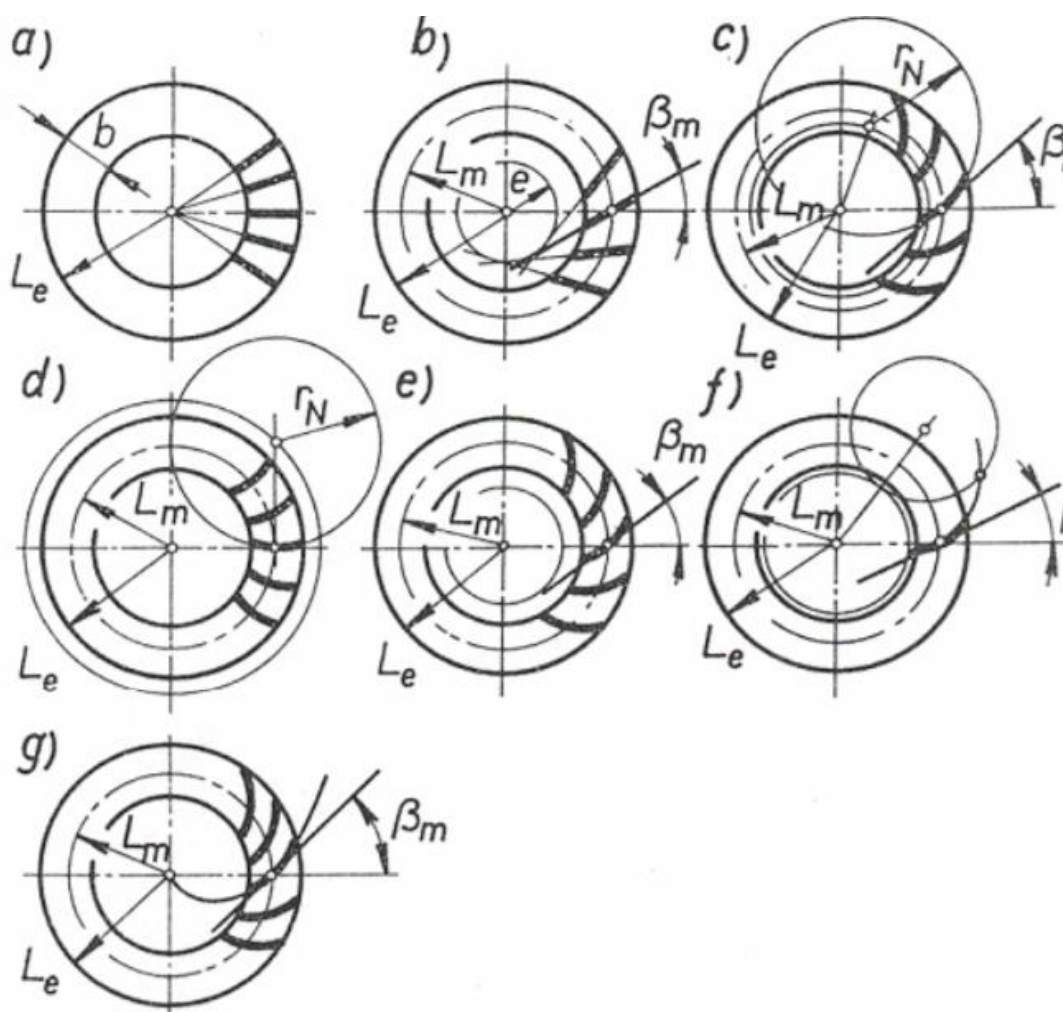
Použití tohoto tvaru má za důsledek konstantní výšku zubu. V osovému řezu jsou površky roztečného, patního a hlavového kužele rovnoběžné. Pro zuby kruhové a jinak zakřivené. Viz Obr. 1.11. [4]



Obr. 1.11 Tvar III věnce kuželového kola [14]

### 1.3.2 ROZDĚLENÍ KUŽELOVÝCH KOL PODLE ZAKŘIVENÍ ZUBU

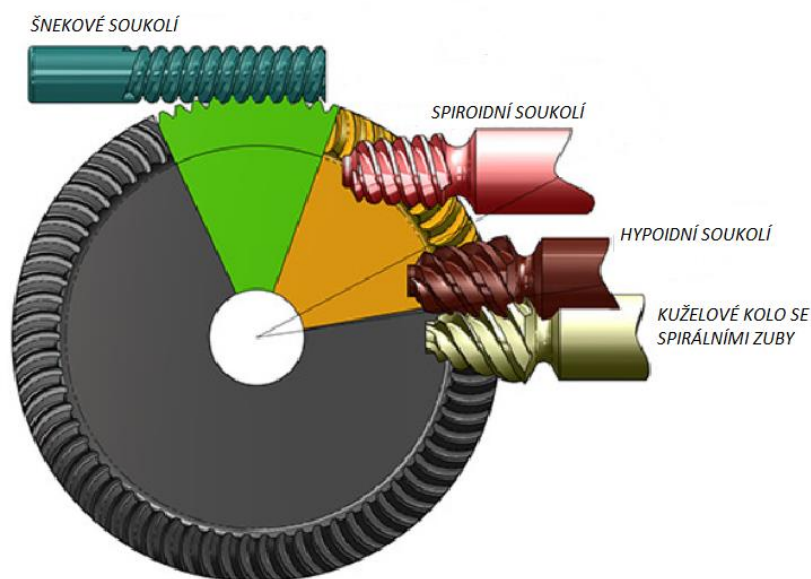
- Kolo s přímými zuby – Řídící křivkou zubu je přímka, která prochází středem kuželového kola
- Kolo se šikmými zuby – Stejně jako u kol s přímými zuby řídící křivkou zubu je přímka, která ale neprochází středem, nýbrž je tečná s pomocnou kružnicí o poloměru  $e$  (excentricita). Úhel sklonu  $\beta_m$  nabývá hodnot od  $20^\circ$  do  $40^\circ$ .
- Kolo s kruhovými zuby – Řídící křivka zubu je kružnice, která má střed na pomocné kružnici. Úhel sklonu  $\beta_m$  je  $30^\circ$  až  $45^\circ$ .
- Kolo s kruhovými zuby, systém Zerol – Tento typ kol s kruhovými zuby je charakteristický tím, že úhel sklonu  $\beta_m$  je  $0^\circ$ . Systém Zerol kombinuje výhody kol s přímými zuby (malé axiální síly) a kol se zakřivenými zuby.
- Kolo s paloidními zuby – Řídící křivkou zubu je paloida (prodloužená evolventa). Pro tento typ zubů se volí tvar věnce III se zuby o stálé výšce. Úhel sklonu  $\beta_m$  bývá od  $30^\circ$  do  $45^\circ$ .
- Kolo s eloidními zuby – Řídící křivkou je eloida (část prodloužené epicykloidy). Úhel záběru bývá  $\beta_m = 30^\circ$  až  $45^\circ$ .
- Kolo se spirálními zuby – Řídící křivkou je logaritmická nebo Archimédova spirála. Viz Obr. 1.12. [4]



Obr. 1.12 Rozdělení ozubených kol podle zakřivení zubu [4]

## 1.4 ŠROUBOVÁ SOUKOLÍ

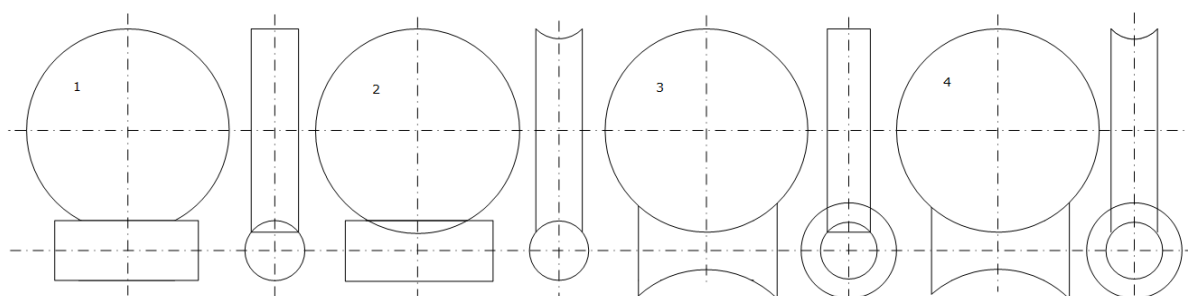
Šroubová soukolí vytváří kinematické a silové vazby mezi dvěma mimoběžnými hřídeli. Pastorek a kolo konají šroubový pohyb, tzn. současně se po sobě odvalují a posouvají. Vlivem tohoto pohybu jsou na návrh tohoto soukolí kladeny jiné požadavky než na návrh soukolí valivého. Kvůli vysokým tlakům a skluzovým rychlostem je důležitá vhodná volba kombinace materiálu. Materiály musí mít nejen požadovanou pevnost a tvrdost, ale i dobré třecí vlastnosti, kvůli již zmíněnému šroubovému pohybu, protože v soukolí vzniká značné tření. Důležitá je také odolnost proti opotřebení a dalším poruchám jako zadírání a pitting. Na Obr 1.13 lze vidět jednotlivé druhy šroubových soukolí, které se dělí podle vzájemné polohy os hřídelů, a kuželové kolo se spirálními zuby. [1]



Obr. 1.13 Rozdělení šroubových soukolí podle vzájemné polohy os hřídelů [22]

#### 1.4.1 ŠNEKOVÁ SOUKOLÍ

Šneková soukolí se používají pro úhel mimoběžných os  $90^\circ$ . Místo pastorku mají šneková soukolí jednochodý nebo vícechodý šroub, který se označuje jako šnek. Kolo se označuje jako šnekové kolo. Šneková soukolí mohou realizovat vysoké převody např.  $i = 10$  až 80. Jejich charakteristickou vlastností je tichý chod. Mezi výhodou patří, že při obráceném směru pohybu se mohou navrhnut jako samosvorná. Šneková soukolí nejsou tak účinná, jako čelní soukolí kvůli vysokému tření mezi šnekem a šnekovým kolem. Na Obr. 1.14 lze vidět jednotlivé typy podle provedení šneku a šnekového kola. [1]

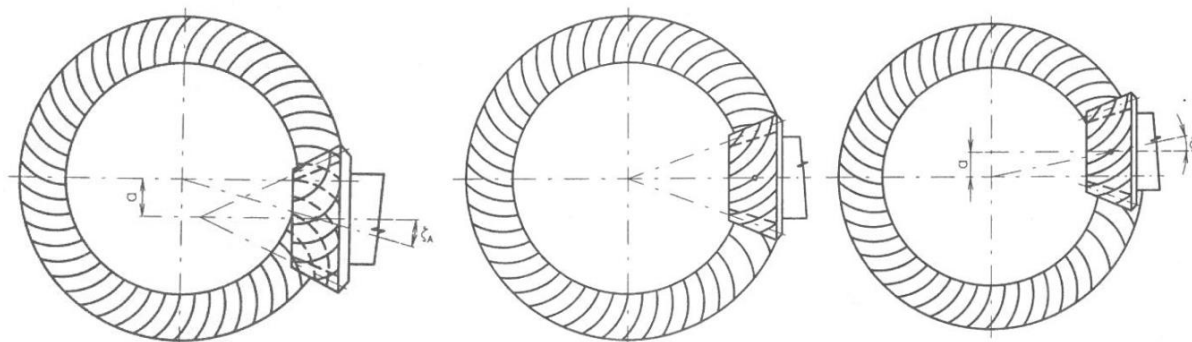


Obr. 1.14 Druhy šnekových soukolí 1) válcové kolo i šnek 2) válcový šnek a globoidní kolo 3) globoidní šnek a válcové kolo 4) globoidní šnek i kolo



### 1.4.2 HYPOIDNÍ SOUKOLÍ

Mezi další typy šroubového soukolí patří hypoidní soukolí. Provádí se nejčastěji se zakřivenými zuby. Ve srovnání s normálními kuželovými koly lze dosáhnout většího převodového čísla, mají klidnější chod, ale vyznačují se menší účinností. Je nutné je mazat speciálními oleji. Používají se pro převod v rozvodovce dražších osobních automobilů a pro pohon náprav kolejových a silničních vozidel. Provádějí se ve třech typech s přesazením os ( $a > 0$ ), bez přesazení os a s přesazením os ( $a < 0$ ), jak je zobrazeno na Obr. 1.15.[1]



Obr. 1.15 Hypoidní soukolí s přesazením os ( $a > 0$ ) (vlevo), bez přesazení os (uprostřed), s přesazením os ( $a < 0$ ) (vpravo) [1]

### 1.4.3 SPIROIDNÍ SOUKOLÍ

Dalším druhem šroubových soukolí jsou soukolí spiroidní. Výhodami spiroidních soukolí jsou vysoká tuhost záběru, minimální vůle, tichý chod, schopnost přenášet vysoký točící moment a vysoké převodové poměry od 3:1 až do více než 400:1 a jsou odolné vůči rázům. [21]

## 1.5 SROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ SOUKOLÍ

Na Tab. 1, která byla sestavena podle [10] lze vidět přehled jednotlivých základních typů soukolí a jejich parametrů pro názornější srovnání.

Tab. 1 Srovnání jednotlivých typů soukolí [10]

Typ převodu	Převodový poměr [-]	Účinnost [-]	Výkon [MW]	Otáčky [min <sup>-1</sup> ]	Obvodová rychlost [ms <sup>-1</sup> ]	Poměr hmotnost /výkon [kg/kW]
Čelní ozubené soukolí	45	0,99	35	100 000	40	0,2 – 1,0
Planetové soukolí	1000	0,996	65	150 000	200	0,4 – 1,8
Kuželové soukolí	8	0,98	4	50 000	130	0,6 – 2,5
Hypoidní soukolí	50	0,90	1	20 000	50	0,7 – 3,0
Šroubové válcové soukolí	100	0,95	0,08	20 000	50	1,5 – 3,0
Šnekové soukolí	100	0,98	1,5	50 000	70	0,2 – 4,5

## 2 TYPY PORUCH

Porucha soukolí je stav, při kterém dané soukolí není schopno vykonávat operaci, pro níž bylo navrženo. Konstruktor by tedy při návrhu soukolí neměl počítat pouze s bezproblémovým chodem, ale měl by do výpočtů zahrnout také okolní vlivy, které chod ovlivňují, a právě tyto poruchy způsobují. Nejde-li řádně odhadnout projev těchto vlivů, měl by soukolí navrhnout tak, aby bylo schopno vykonávat svou činnost i při případné poruše. Nejedná-li se tedy o příliš závažnou a nečekanou poruchu.

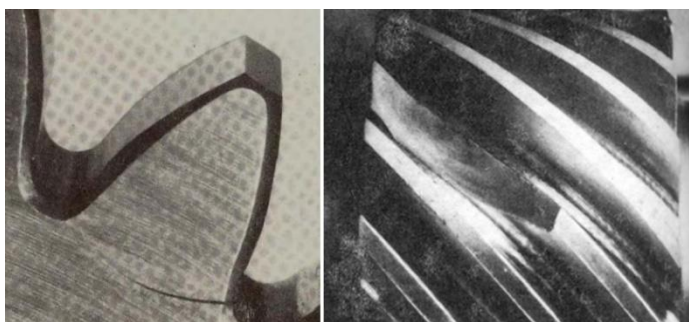
### 2.1 LOM ZUBU

Lom zubu představuje nejnebezpečnější druh poškození. Nebezpečí vzniku lomu hrozí u všech kol silových převodů. Lom zubu může poškodit nejen samotné kolo, ale i úlomek zubu kola může poškodit převodovou skříň, ložiska, hřídele. Lom zubu může být způsoben jednak jednorázovým přetížením soukolí, ale i opakovaným přetížením způsobující nízko-cyklovou únavu, anebo při velkých počtech cyklů, vysoko-cyklovou únavou. Dle charakteru lomové plochy a průběhu lomu je dělíme na křehký lom a únavový lom. Mezi základní výpočty ozubení, které slouží pro kontrolu potenciálního nebezpečí porušení lomem, patří pevnostní výpočet, kontrola na únavu ohybem. [4] [19]

#### 2.1.1 ÚNAVOVÝ LOM ZUBU

Při dlouhodobém postupném únavovém namáhání nad mez pevnosti vzniklém vlivem vysoké koncentrace tahového napětí a cyklickým namáháním se na povrchu zubu iniciují mikroskopické trhliny. Tyto trhliny se postupně začínají spojovat ve větší makrotrhlinu, která proniká hlouběji do zubu až do doby, kdy zbývající průřez není schopen unést vnější zatížení a zub se láme. U kol s přímým ozubením dochází zpravidla k odlomení celého zubu. U kol se šikmým ozubením dochází k odlomení pouze části zubu, jak lze vidět na Obr. 2.1 (vpravo). Lom je iniciován koncentrací napětí většinou v patě zubu. Díky nesprávné montáži může dojít k lomu špičky zubu, tomuto poškození se dá zamezit modifikací zubu. Dále často dochází k lomu okraje zubu. Tento druh lomu vzniká, když trhlinka, která se iniciuje v boku zubu, prorůstá dále na druhou stranu zubu a vlivem určitých podmínek pak změni směr ven ze zubu. [3][4][6]

Ve vnikající trhlině může povrch postupně korodovat. Mazivo se dostává do šířící se trhliny a působí na ni hydrostatickým tlakem. Vznikající koroze se pozná podle červené rzi na povrchu trhliny. Tato vlastnost může být i prospěšná například při kontrole ozubení je možné vidět rez i z velmi malých trhlín. Lomová plocha bývá většinou jemně vydutá. Na povrchu je únavový lom charakteristický lasturovitým, hladkým povrchem. Část, která se odlomila v jednom okamžiku má charakter křehkého lomu. [3]



*Obr.2.1 Šířící se únavová trhlina v patě zubu (vlevo), Odlomení části zubu šikmého ozubení (vpravo) [16] [19]*

### 2.1.2 KŘEHKÝ LOM ZUBU

Vzniká při náhlém rázu nebo přetížení soustavy nad mez pevnosti, zpravidla se vyskytuje u zubů s křehkou strukturou jádra. Nejčastěji křehký lom zubu začíná v jeho kořenu, vyplývá to z teorie o představě zubu jako vetknutého nosníku, jehož nebezpečné místo je ve vetknutí (viz Obr. 2.2). Pokud tomu tak není, jedná se o nestandartní případ anebo je tento jev způsoben dalšími vlivy. Když je zub soukolí poškozován i únavovým vydrolováním, může se stát, že se trhlina křehkého lomu začne iniciovat v důlku způsobeným právě tímto jevem. Po kalení povrchů zubů ozubení do velké hloubky se může stát, že příliš tvrdý povrch zubu se oddělí od tepelně neopracovaného jádra zubu. Podpovrchové napětí, způsobené záběrem zubů soukolí může způsobit lom v jakémkoli místě zubu. Lomová plocha křehkého lomu bývá zpravidla vypouklá a zrnitá. [3]

Ve srovnání s únavovým lomem je lom křehký, více energeticky náročnější pro vznik. Proto při poškození více zubů kola lomem, se první zuby, které se vylamují, se vylamují v důsledku únavy. Při dalších záběrech ozubeného kola, se vyskytují velké rázy v důsledku vzniklé mezery v ozubení, které způsobují lom dalších zubů. Tento lom je zpravidla křehkého charakteru. [2]



*Obr.2.2 Vylomený zub v důsledku křehkého lomu [15]*

## 2.2 ÚNAVOVÉ VYDROLOVÁNÍ

Únavové vydrolování neboli anglicky pitting vzniká u uzavřených převodových soukolí s dostatečným množstvím mazací kapaliny bez abrazivních složek. Únavové vydrolování je povrchová únava materiálu způsobena cyklicky proměnlivým zatížením zubu. Trhlina vzniká pod povrchem zubu, kde je celkové napětí největší. Tyto malé trhliny prorůstají na povrch a plní se tekutým mazivem. U trhlín, které se nachází na hlavě zubu vchází do tlakové části nejprve dno trhliny. Tímto se trhlina postupně svírá a vytlačuje tak mazivo ven ze sebe. Trhlina se tedy podstatně nezvětšuje. U trhlín na patě zubu se do tlakové části nejprve dostává ústí trhliny, tak se olej v trhlíně uzavírá, tlak se přenáší na mazivo uzavřené v trhlíně a taktéž mazivo působí tlak na trhlinu a tímto ji zvětšuje. Trhliny z povrchu se šíří dále do zubu a spojují se s dalšími trhlínami vzniklými pod povrchem. Dojde ke vzniku jamky, tedy k vydrolení povrchu. [3] [6]

Únavové vydrolování se většinou začíná šířit v místech na patě zubu kolem roztečné kružnice, kde dochází k vysokým tlakům a velkým třecím silám. U pastorků je zpravidla výskyt vydrolování pravděpodobnější, a to ze dvou důvodů. Zaprvé, pastorek je menší než hnané kolo a musí tedy vykonat více otáček a tím je namáhán na únavu víc než hnací kolo. Za druhé pastorek je většinou realizován jako hnací člen (někdy je možno ho použít při brždění, poté toto neplatí) a to znamená, že materiál má tendenci se od roztečné kružnice oddalovat při vstupu zubů do záběru, tím zůstává čelo pastorku kolem roztečné kružnice napnuté a oslabené. [3]

### 2.2.1 OMEZENÉ VYDROLOVÁNÍ

Omezené, nebo jinak i počáteční, vydrolování probíhá většinou při zkušebním záběhu soukolí jako projev zvýšeného tlaku (menší dotyková plocha) při záběru, způsobuje ho nepřesná montáž nebo samotná výroba. První jamky, o velikosti 25 až 50  $\mu\text{m}$ , vznikají v okolí roztečné kružnice. V průběhu dalších záběrů, kdy se zatížení začne přenášet po větší ploše zubu, omezené vydrolování ustává. U měkkých materiálů se mohou jamky srovnat otěrem. Dalo by se říct, že z provozního hlediska je omezené vydrolování neškodné. [4] [19]

Na Obr. 2.3 (vlevo) je vidět omezené vydrolování čelního ozubeného kola se šikmými zuby způsobené nesouosostí hřídelů. Omezené vydrolování začalo jako lokální porucha v oblasti roztečné kružnice a začalo se dále šířit do oblasti paty zubu. V tomto případě po vyrovnaní zatížení se vydrolování zastavilo a samotné jamky se začaly otěrem vyhlazovat. Tento průběh je typický pro ozubená kola se střední tvrdostí. [19]

### 2.2.2 PROGRESIVNÍ VYDROLOVÁNÍ

U progresivního vydrolování vznikají neustále nové jamky, které se šíří a postupně pokrývají celý povrch zubu, jak lze vidět na Obr. 2.3 (uprostřed). Při vzniku prvotních jamek se zmenšuje nosná plocha, to má za důsledek zvýšení tlaku. Tímto zvyšováním tlaku se vytvářejí stále nové a nové jamky až do úplného zničení povrchu. Je narušena geometrie boční plochy zubu, dále se zvyšují dynamické síly, roste hlučnost soukolí a na povrchu dochází k dalším nežádoucím jevům jako je otěr a zadírání. Vyskytuje se u dobře mazaných soukolí, která jsou dimenzována pro přenos větších zatížení a mají velmi tvrdý povrch. Oproti tomu u špatně mazaných převodů se značným otěrem a u kol z měkkých materiálů se progresivní vydrolování většinou nevyskytuje. Protože potenciální iniciační trhlinky jsou otřeny ještě před jejich možným zvětšováním. [4]

U šnekových kol nebo u kol se zakřivenými zuby se může progresivní vydrolování projevit takzvaným odlupováním, anglicky spalling. Odlupování se zpravidla objevuje u povrchově kalených ozubení a je způsobeno změnami napětí v podpovrchové vrstvě, lze vidět na Obr. 2.3 (vpravo). [20]



*Obr. 2.3 Omezené vydrolování (vlevo), progresivní vydrolování (uprostřed), odlupování (vpravo) [17][19]*

### 2.2.3 MIKRO – PITTING

Mikro-pitting nastává při záběru zubů, které se nachází v režimu elasto-hydrodynamického anebo mezního mazání. Mikro-pitting ovlivňuje zátěž, teplota, povrch a chemické složení maziva a zpravidla se vyskytuje u ozubení s velkou tvrdostí povrchu. Od pittingu se liší velikostí vznikajících jamek. Tyto jamky bývají zpravidla hluboké 10 až 20  $\mu\text{m}$ , mechanika vzniku je stejná. [6]

## 2.3 OTĚR ZUBU

Při otěru dochází na povrchu zubu k nežádoucímu úběru materiálu, které může být způsobeno několika způsoby. Mezi nejčastější příčiny otěru patří přímý kontakt zubů v důsledku nedostatku mazacího filmu, obsažení abrazivních částic v mazivu a také špatné chemické složení aditiv v mazivu. Otěr se dělí na abrazivní, adhezivní a chemický. [19]

### 2.3.1 ABRAZIVNÍ OTĚR

Abrazivní otěr se objevuje zvláště u otevřených převodů, kde převod není chráněn před abrazivními částicemi vnikajícími do soustavy z okolí. Objevuje se i v uzavřených převodech, při nesprávném utěsnění převodové skříně, anebo když se soukolí nachází v prашných prostředích, v dolech, lomech. Při velmi špatných podmínkách, může dosáhnout otěr značných hodnot v krátkém čase. [4] [19]

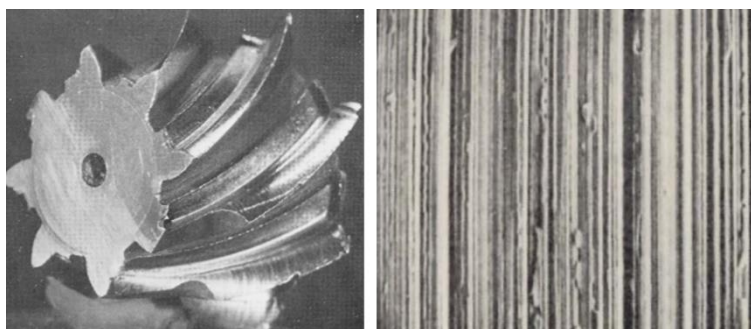
### MÍRNÝ ABRAZIVNÍ OTĚR

Na Obr 2.4 (vlevo) lze vidět mírný abrazivní otěr se, kde mazivo obsahuje jemné částice prachu nebo písku. Otěr je velmi slabý, a tak samotný úběr materiálu není tak značný a negativně

se projevuje až po značné době. Vliv na něj má i viskozita maziva, rychlost soukolí a teplota. [7][19]

### TĚŽKÝ ABRAZIVNÍ OTĚR

Vzniká v důsledku kontaminace maziva zvýšeným množstvím poměrně velkých abrazivních částic v mazivu, například úlomky ze zubů nebo jiných částí soustavy, nečistotami vzniklými při svařování, rzi, pískem. Na Obr 2.4 (vpravo) lze vidět, jak tyto částice vytváří rýhy na povrchu ve směru skluzu zubu. Při velkých tlacích a skluzových rychlostech může dosáhnout otěr i v řádu mikrometrů za hodinu. Úběr materiálu způsobuje vyšší dynamické zatížení, hlučnost soukolí, anebo lom zubu. [4] [7] [19]

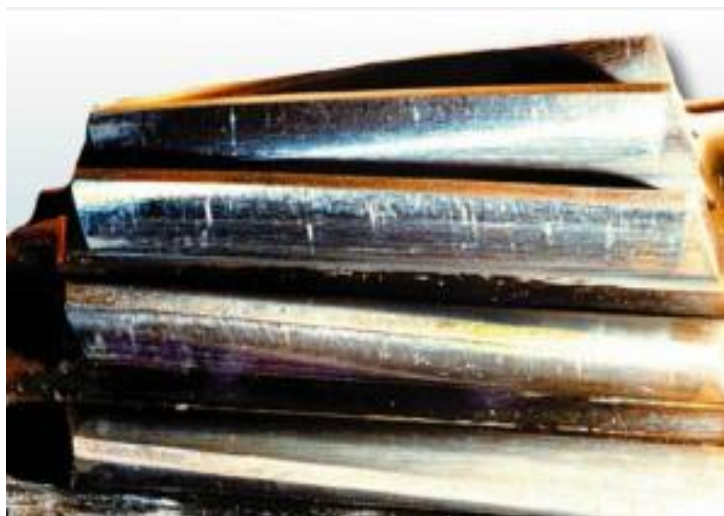


*Obr. 2.4 Mírný abrazivní otěr (vlevo), povrch zubu opotřebovaného těžkým abrazivním otěrem (vpravo) [19]*

### 2.3.2 ADHEZIVNÍ OTĚR

Při zadírání vznikají lokální velmi pevné atomární vazby mezi dvěma povrchy boků zubů, jinak se zadírání označuje jako studený svar. Projevuje se již od spuštění soukolí lehkým otěrem, v některých případech lze detekovat až po milionech cyklů. Z boku povrchu zubu o menší pevnosti se zrna, spojená studeným svarem, vytrhávají a na protějším zubu se vytváří nárůstek. Tyto nárůstky dále poškozují povrch protějšiho zubu otěrem. Zadírání může nastat při polokapalinovém mazání, kdy mazivo netvoří dostatečný mazací film nebo také při úplném vypaření mazacího filmu, způsobené vysokými teplotami a tlaky v dotyku. Zadírání způsobuje opotřebování boku zubu, zvýšení teploty, dynamického namáhání, zvuku soukolí a může vést i ke zhoršení účinnosti. Zadírání se může samo regulovat, což znamená, že při zmenšení přetížení, se mohou vzniklé drážky vyhladit a soukolí může opět lépe pracovat. U kol s měkkým povrchem, při velmi vysokých zatížení a převodových rychlostech se zadírání přechází použitím speciálního aditivního maziva tzv. hypoidní olej, dále se zadírání dá předcházet nitridováním a cementováním. Zadírání vytváří lesklý, leštěný povrch s drážkami lehce viditelnými okem, jak dokládá Obr. 2.5. [4] [6]

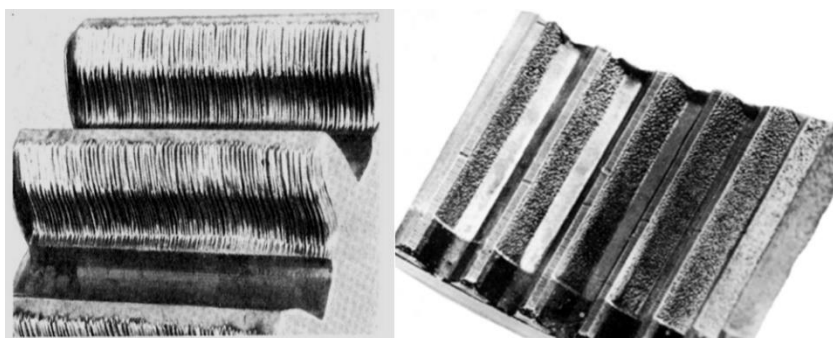




*Obr. 2.5 Zadírání u šikmého ozubení [16]*

### 2.3.3 CHEMICKÝ OTĚR

Chemický otěr vzniká v důsledku chemické reakce maziva nebo aditiv obsažených v mazivu. Ozubení poškozené chemickým otěrem lze vidět na obrázku 2.6 (vlevo). Na obrázku 2.6 (vpravo) je ukázán chemický otěr způsobený kyselým mazivem. [4][6]



*Obr. 2.6 Ozubení poškozené chemickým otěrem (vlevo), chemický otěr ozubení způsobený kyselým mazivem (vpravo) [19]*

## 2.4 PLASTICKÁ DEFORMACE

K plastické deformaci dochází, když hodnota kombinace dotekového napětí a napětí vzniklé skluzem v záběru soukolí překročí mez kluzu materiálu. Tato porucha postihuje zpravidla ozubená kola z měkkých materiálů, ale při určitých podmínkách se může vyskytnout i u kol z tvrdého materiálu. Kvůli nedokonalému překlada do češtiny jsou názvy následujících podkapitol uvedeny v angličtině.



### 2.4.1 COLD FLOW

Jedná se o nejběžnější případ plastické deformace ozubení z měkkého materiálu, která vzniká z důvodu vysokého napětí v záběru soukolí. Materiál se deformuje za špičkou zubu a tvoří výčnělek. Při chodu soukolí s touto poruchou vznikají vyšší vibrace a hluk. Cold flow, viz Obr. 2.7 (vlevo), lze zamezit použitím tvrdšího materiálu pro dané kolo.

### 2.4.2 RIPPLING

Rippling tvoří šupinatý a zvlněný povrch, vzniká při nízké rychlosti a nedostatečném mazání. Vyskytuje se zpravidla u kalených ozubených kol. Tento jev značí problém pouze tehdy, když se při dalším chodu nezastaví. Rippling lze vidět na Obr. 2.7 (uprostřed).

### 2.4.3 RIDGING

Ridging je povrchová deformace, která má za následek série výčnělků a prohlubní na povrchu boku zubu. Ridging se objevuje při kombinaci vysokých dotykových napětí a malých rychlostí. Nejvíce se objevuje u velmi zatížených šnekových a hypoidních soukolí. Ridging je na Obr. 2.7 (vpravo). [19]



Obr. 2.7 Cold flow (vlevo), Rippling (uprostřed), Ridging (vpravo)[17] [18] [19]

## 2.5 TRHLINY

Vznik trhlin v soukolí je spojen s nesprávným technologickým postupem při výrobě nebo při následném tepelném zpracování. Například při nesprávném broušení vznikají malé trhliny na povrchu boku zubu. Při nedodržení správného technologického postupu při kalení vznikají dlouhé a hluboké trhliny, které mohou vést až k roztržení samotného ozubeného kola. Dále mohou trhliny vzniknout v důsledku obsazením vměstků v materiálu. [20]

## 2.6 OPRAVY OZUBENÍ

Poškozené soukolí (viz Obr. 2.8 a)) lze při správném technologickém postupu relativně dobře opravit. U ozubeného kola, které má vylomený celý zub se nejdříve daná plocha lomu vybrousí a začistí, jako je znázorněno na Obr 2.8 b). Poté se musí na dané místo přidat materiál. Materiál se nejčastěji navažuje a volí se podle tvrdosti a ostatních parametrů soukolí. Materiál se může navařovat (viz Obr 2.8 c)), buď pouze pomocí kovové elektrody, anebo se případně může na ozubené kolo přivařit ocelový kvádr odpovídající velikosti. Dále se takto upravené ozubené

kolo musí obrobit. Dané místo se nejdříve soustruží, aby tloušťka a poloměr na novém zubu byl stejný jako na zbytku kola, poté se vyrábí samotný příslušný tvar zubu a zubové mezery pomocí frézování odvalovacím způsobem, Obr 2.8 d). Podle požadované přesnosti se může přistoupit k dokončovací metodám stejným jako při samotné výrobě ozubení. Při poškození povrchu zubu například vydrolováním nebo otěrem se postupuje obdobně. Na vzniklé jamky a krátery se navaří materiál, který je poté obroben na potřebný tvar.



*Obr. 2.8 a) Poškozené soukolí, b) Vybroušená plocha lomu, c) Soukolí po navaření materiálu, d) frézování odvalovacím způsobem [22]*

### 3 PROVEDENÍ TECHNICKÉHO EXPERIMENTU

V jednotlivých etapách návrhu jsou používány rozdílné přístupy pro navržení převodového ústrojí, které splňuje vysoké technicko-ekonomické požadavky. V době prvotního konstrukčního návrhu se jedná především o využití numerických simulací, které jsou po vyrobení prototypu následně doplněny i technickými experimenty. Výsledky z obou přístupů se následně porovnávají za účelem zvýšení úrovně numerických modelů a minimalizace nutnosti výroby prototypů, které jsou finančně velmi nákladné. Zároveň je vytvářena znalostní databáze, která je velmi cenným know-how každého výrobce.

Po vyhotovení prototypu převodového ústrojí je možné provést technický experiment. Za tímto účelem je však nutné navrhnout testovací stav, který bude respektovat celý rozsah provozních podmínek, případně je možné provádět měření na celém finálním výrobku. Druhý přístup je z hlediska komplexnosti a dosažení provozních podmínek lepší, avšak vzhledem k nutnosti výroby celého výrobku, jež nemusí být výrobkem jen jednoho dodavatele, je využíván až v pozdější fázi.

Při vývoji se využívá nejčastěji komerčně dostupného softwaru jako je Ansys, ADAMS, KISSOFT a to včetně jejich pluginů. Užití těchto softwarů umožňuje konstruktérům navrhnout převodové ústrojí s danými parametry. I přesto se však v technické praxi, a to jak ve fázi vývoje, tak i v provozu, můžeme setkat s případy, kdy dochází k poškození skříně, hřídelí, ložisek, ale i ozubených kol, jež jsou zmíněny v předcházející části práce.

V případě vývoje prototypu, v některých případech i za provozu dražších převodových ústrojí, jsou jednotlivé komponenty osazeny měřicí technikou. Nejčastěji se využívá akcelerometrů, vibrometrů, mikrofónů, akustické intenzitní sondy, akustického pole či intenzitního pole. Pro záznam signálů existuje v současné době široká škála analyzátorů, které se mohou dodávat včetně softwaru.

V rámci této bakalářské práce bylo provedeno měření převodového ústrojí v celém jeho provozním rozsahu, přičemž byly provedeny záznamy na počátku životnostního testování, v průběhu a na závěr.

#### 3.1 MĚŘENÍ VIBRACÍ

Převodové ústrojí bylo upevněno na testovacím stavu, přičemž pohon byl zajištěn motorem a maření energie bylo zajištěno dynamometrem. Z důvodu zjištění otáček bylo využito TACHO sondy, která snímala otáčky setrvačníku, jež jsou stejné jako otáčky na vstupní hřídeli převodového ústrojí. Pro zjištění vibračního projevu bylo využito akcelerometrů, viz Obr. 3.1. Vzhledem ke komplexní geometrii převodového ústrojí bylo nutné využít většího počtu akcelerometrů, které byly umístěny na převodové skříně. Jednotlivá místa byla určena na základě předchozích numerických simulací, jež předcházela tomuto měření a překračují rámec této práce. V neposlední řadě byly akcelerometry umístěny na místa, kde se nacházejí ložiska, aby bylo možné posoudit změny, respektive poškození, na ozubení. Pro sběr dat bylo užito 30 kanálového analyzátoru od společnosti Brüel & Kjaer, přičemž bylo využito 17 kanálů, viz. Obr. 3.1.



*Třiosý akcelerometr č. 3*



*Detail připevnění akcelerometru*



*30 kanálový analyzátor*

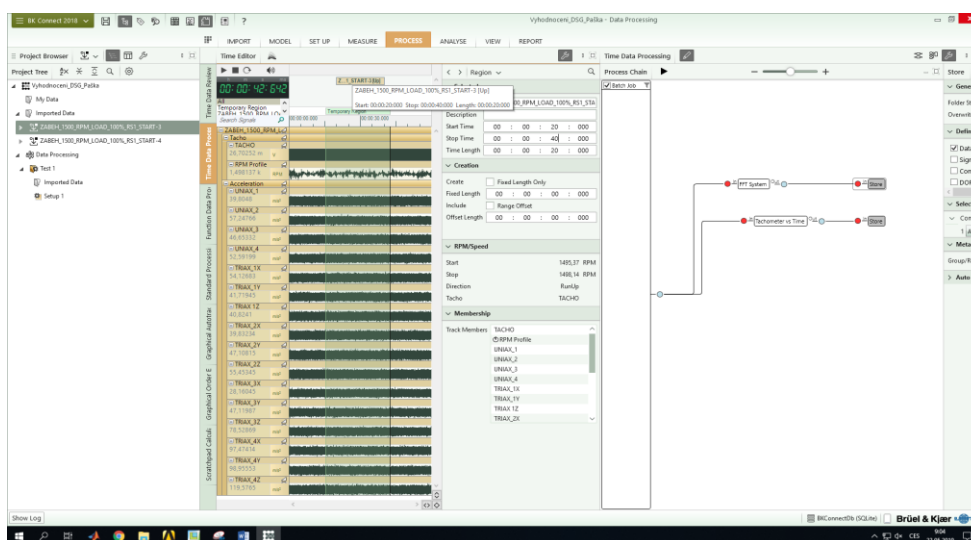


*Jednoosý akcelerometr č. 1*

*Obr. 3.1 Fotografie z měření*

### 3.2 VYHODNOCENÍ VIBRACÍ

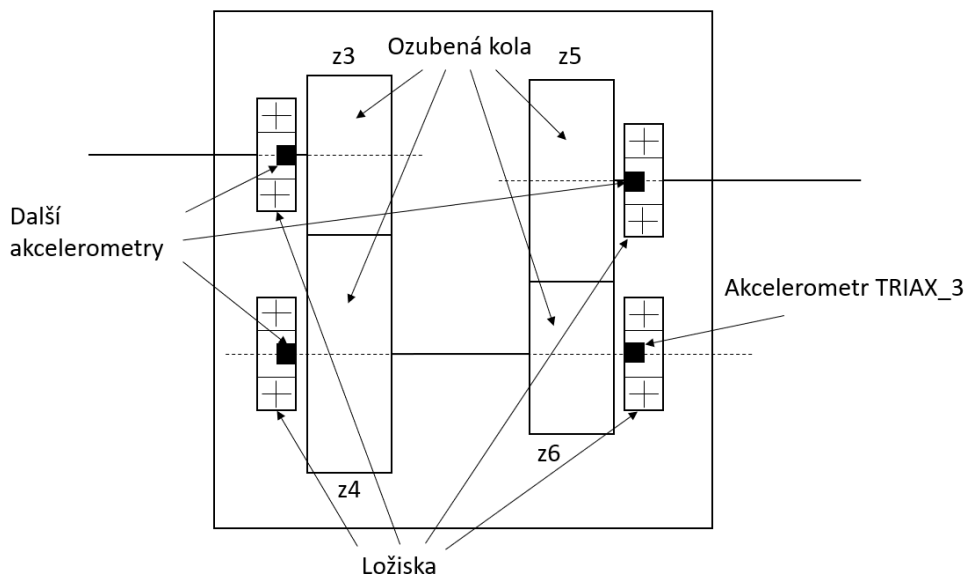
Naměřená data byla vyhodnocena v prostředí Pulse Connect (viz Obr. 3.2), kterým Ústav automobilního a dopravního inženýrství na VUT disponuje. Z jednotlivých záznamů, které byly vždy 60 vteřin při ustálených provozních podmínkách, byly vybrány časové intervaly o délce 20 s, a to z důvodu, že u spalovacího motoru mohlo docházet k mírné změně otáček. Byla tak vždy vybrána oblast s malou změnou provozních podmínek.



Obr. 3.2 Vyhodnocovací prostředí Pulse Connect

### 3.2.1 SCHÉMA PŘEVODOVKY

Měření vibrací bylo provedeno na čtyřstupňové převodovce. K poruše došlo na soukolí z3/z4, které se využívá při zařazení prvního rychlostního stupně. Pro názornost je na Obr. 3.3 schematicky znázorněna převodovka včetně popisu ozubených kol, ložisek a akcelermetrů. Akcelerometry byly umístěny na skříni v místech, kde se nacházela ložiska. Toto umístění je z důvodu přenosové cesty, kdy je cílem získat odezvu na buzení od záběru ozubení. Vlivem záběru ozubení, poškozeného i nepoškozeného, dochází k přenosu sil mezi jednotlivými koly, jež není konstantní, ale je závislé na otáčkách a počtu zubů daných kol – zubová frekvence. Toto buzení se dále šíří po přenosových cestách, tedy z ozubeného kola na hřídel, dále na ložiska a skříň převodovky. Jelikož je měření pomocí akcelermetrů realizováno až na skříni převodovky, je tedy nutné minimalizovat vliv modálních vlastností skříně převodovky na měřená data. Z tohoto důvodu je vhodné umístit akcelerometry co nejblíže ložiskům, kde je vysoká tuhost skříně a zároveň vhodně určit jejich orientaci.

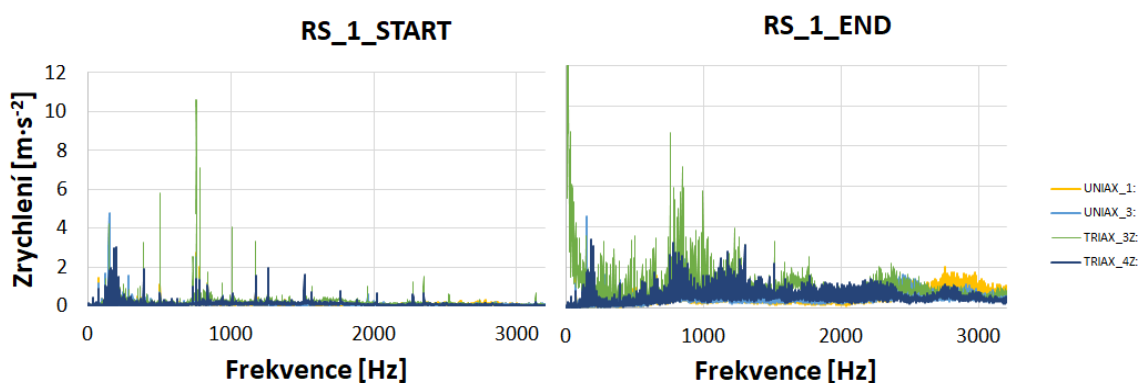


Obr. 3.3 Náhradní schéma převodovky



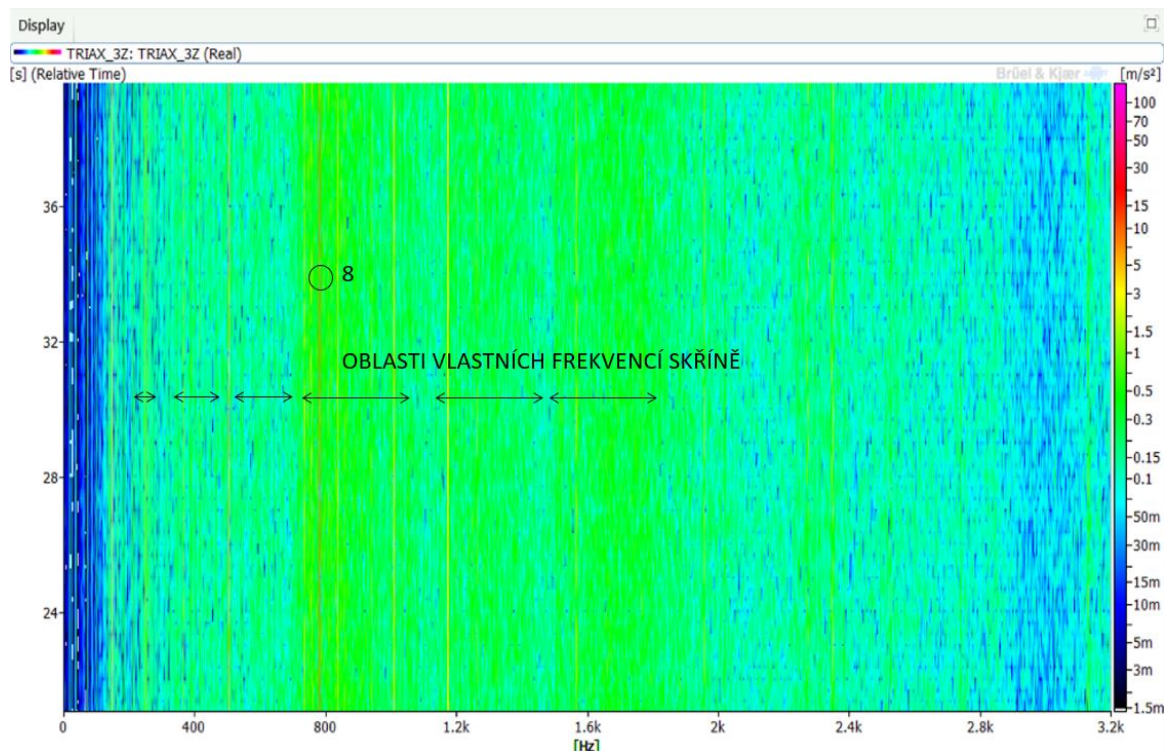
### 3.2.2 ROZBOR VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ VIBRACÍ PŘED PORUCHOU

Naměřené hodnoty vibrací byly na jednotlivých akcelerometrech odlišné, viz obr. 3.4. Pro ukázkou vyhodnocení měření bylo využito dat z akcelerometru umístěného na domku ložiska uloženého na hřídeli, na které jsou kola z4 a z6, přičemž nejbližší k akcelerometru dochází k záběru kol z5/z6. Tento akcelerometr TRIAX\_3Z je tříosý, pro vyhodnocení se použily data pouze ze směru z, tedy z normálového směru povrchu.



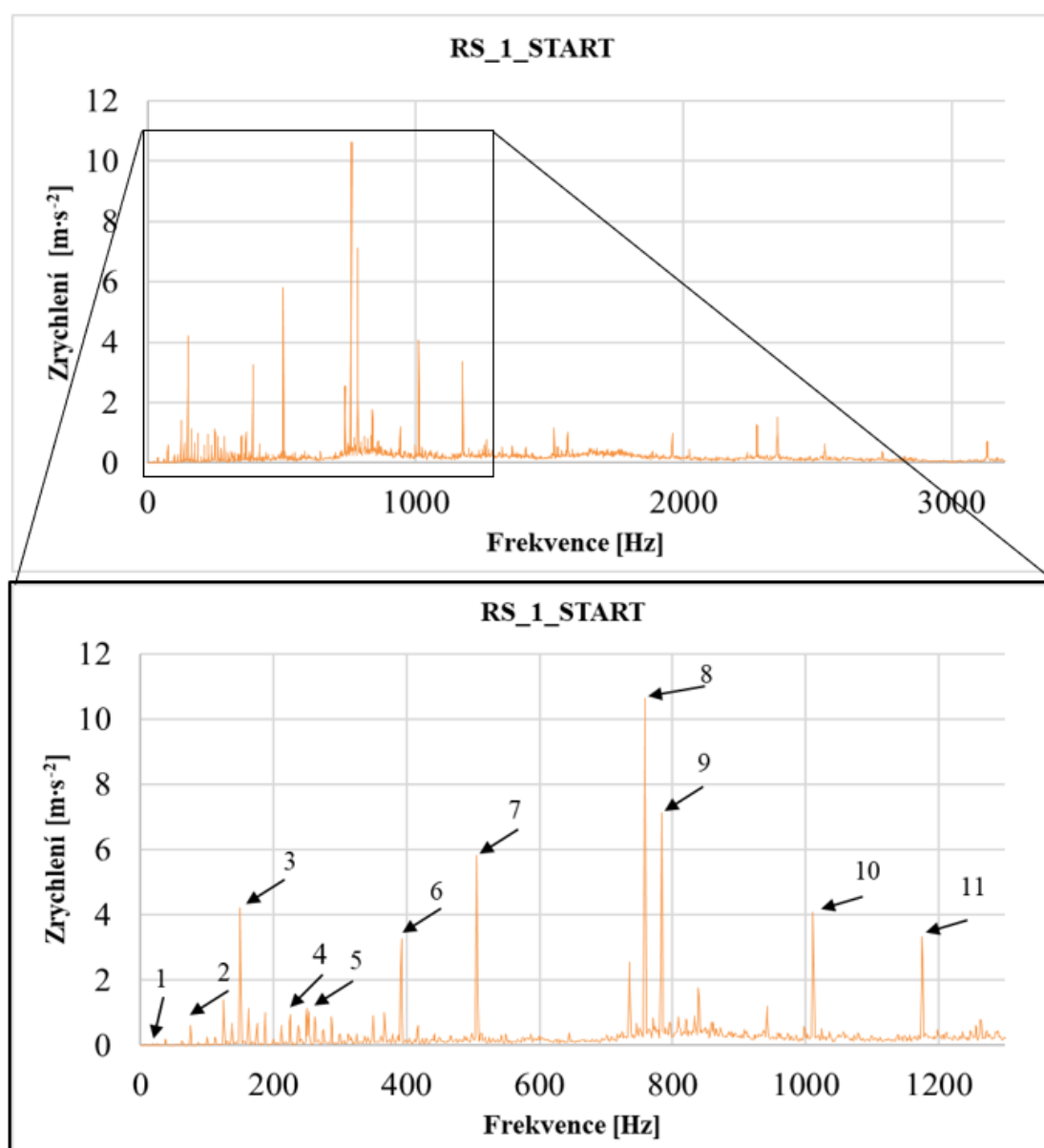
Obr. 3.4 Naměřené hodnoty vibrací na jednotlivých akcelerometrech

Na multispektru (viz Obr 3.5) je patrné, že se velikosti zrychlení v průběhu času významně nemění, jedná se totiž o ustálený stav. Dále lze určit, že v oblasti 8 se nachází maximální amplituda vibrací, kdy dochází k průniku třetího řádu zubové frekvence z5/z6 a jedné z vlastních frekvencí skříně. Dále jsou na obrázku zvýrazněny oblasti vlastních frekvencí, kdy se v každé oblasti se nachází několik vlastních frekvencí, jež jsou v malém frekvenčním rozsahu.



Obr. 3.5 Multispektrum výsledků měření vibrací před poruchou

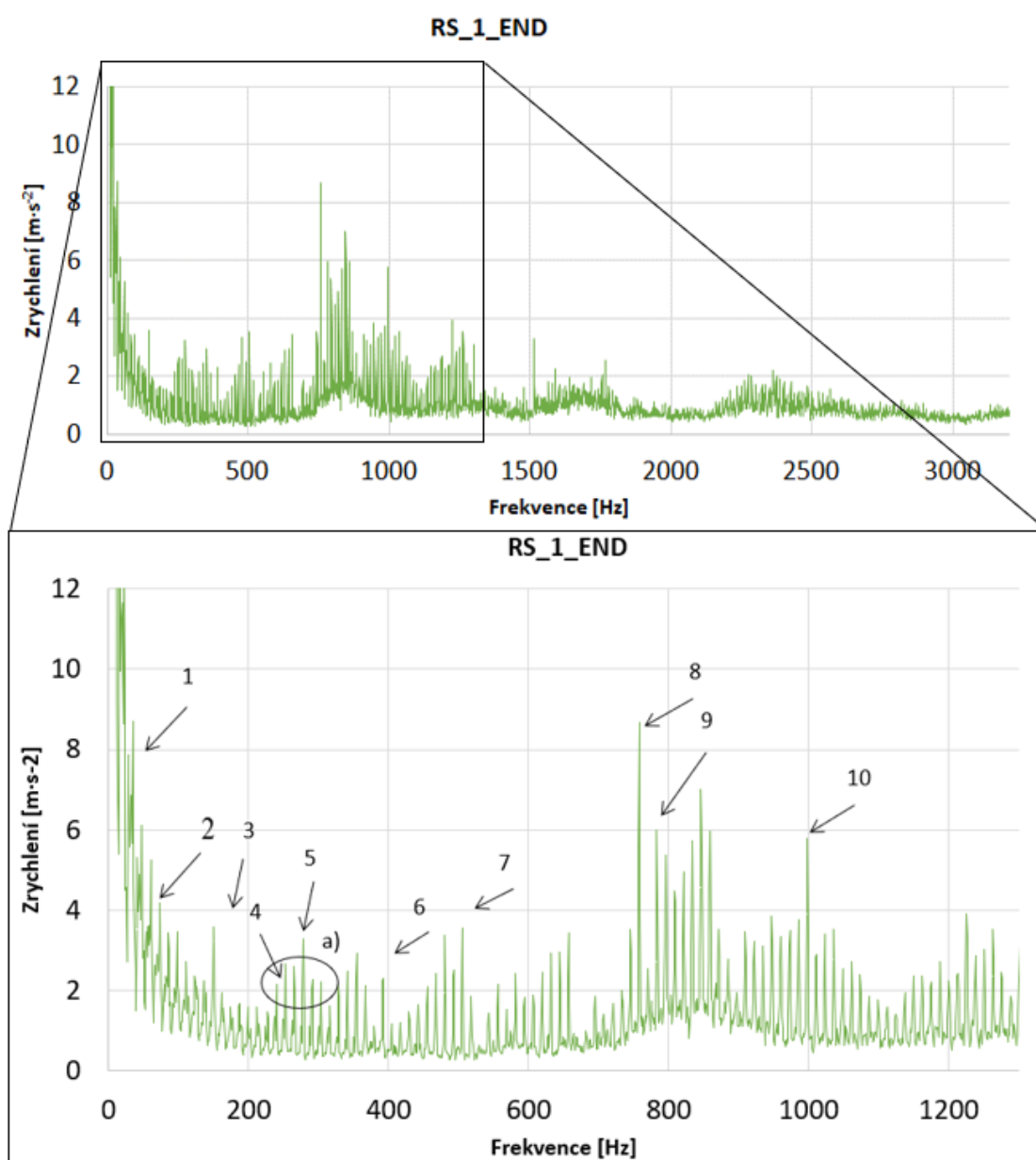
Další amplitudy jsou přehledněji zobrazeny na Obr 3.6, kde je zobrazeno FFT v jednom časovém okamžiku. Z obrázku je patrné, že postačí provést frekvenční rozbor do 1300 Hz, kde se nacházejí dominantní hodnoty zrychlení povrchu. Na obrázku jsou označeny významné amplitudy na základě provedení frekvenčního rozboru, kdy 1 je první řád otáčkové frekvence o velikosti 25 Hz. Jelikož pohon byl realizován šestiválcovým motorem, musí se zahrnout do rozboru i jeho dominantní frekvence. Tyto dominantní frekvence jsou násobky otáčkové frekvence. U šestiválcového motoru jsou dominantní frekvence třetí (2), šestý (3) a devátý (4) násobek otáčkové frekvence. Dále se do rozboru musí zahrnout i zubové frekvence obou soukolí. První řád zubové frekvence soukolí z5/z6 má frekvenci o velikosti 253 Hz (5), druhý řád 506 Hz (7), třetí řád je již zmíněná maximální hodnota (8), čtvrtý řád 1011 Hz (10). První řád zubové frekvence soukolí z3/z4 má frekvenci o velikosti 392 Hz (6), druhý řád 784 Hz (9), třetí řád 1175 Hz (11).



Obr. 3.6 Frekvenční rozbor výsledků měření vibrací před poruchou

### 3.2.3 ROZBOR VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ VIBRACÍ PŘI PORUŠE

V rámci životnostního testování došlo k poškození ozubení, přičemž před ukončením testu byla zaznamenána data. Na Obr 3.7 lze vidět spektrum výsledků, na kterých jsou zaznačeny stejné významné frekvence jako v předchozí kapitole. Dále například v oblasti a) je možno pozorovat takzvaná postranní pásma, která tvoří jedna dominantní frekvence (5) a další postranní frekvence, které jsou symetricky umístěny po obou stranách vzdálené o násobky otáčkové frekvence. Oblast do 70 Hz vykazuje velkou amplitudu, toto vzniká v důsledku širokopásmového buzení, které je způsobeno porušením ozubení. Vyšší hodnoty zrychlení při frekvenci v oblasti okolo 800 Hz jsou způsobeny průnikem s vlastní frekvencí skříně.

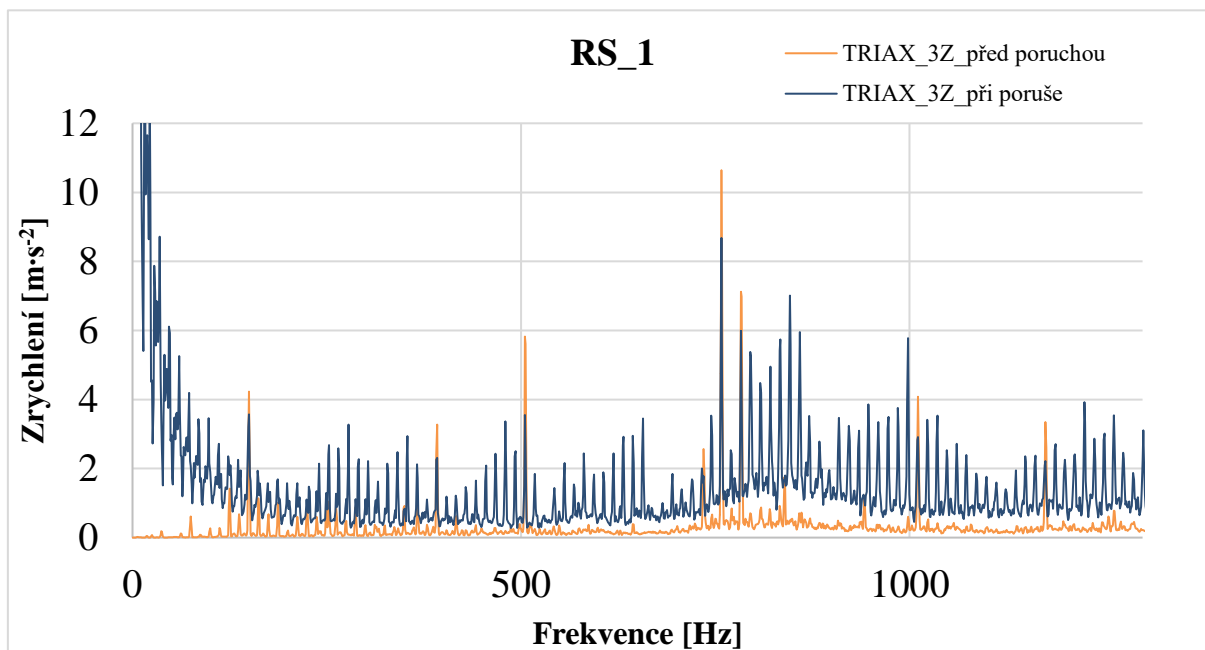


Obr. 3.7 Frekvenční rozbor výsledků měření při poruše

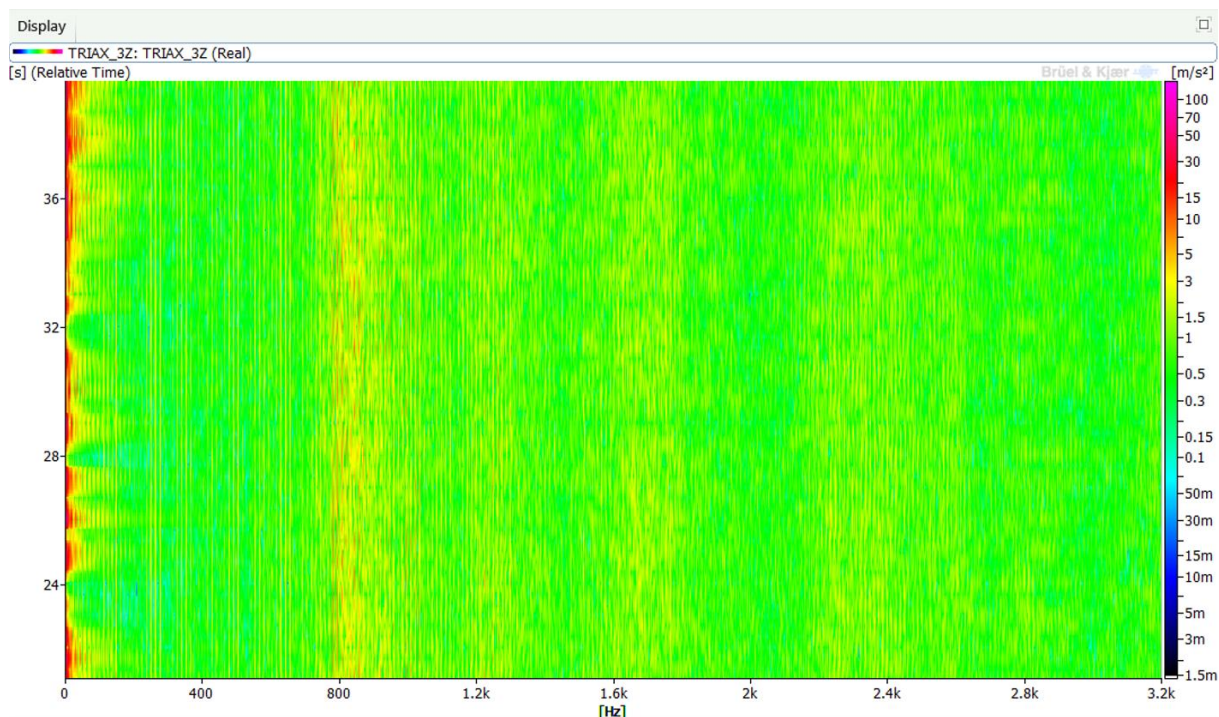


### 3.2.4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ VIBRACÍ

K přehlednějšímu srovnání výsledků průběhu vibrací u soukolí bez poruchy a vibrací u soukolí s poruchou slouží graf (viz Obr 3.8). Z porovnání je patrné, že došlo k navýšení amplitud napříč celým frekvenčním pásmem, a to z důvodu již zmíněného širokopásmového buzení. Nastalo tedy vybudzení kmitání celé součásti postihující celé frekvenční pásmo. Tento jev lze také sledovat na Obr 3.9, který zobrazuje multispektrum výsledků měření při poškození.



Obr. 3.8 Porovnání výsledků měření vibrací



Obr. 3.9 Multispektrum výsledků měření vibrací při poruše

## ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo nejprve zpracovat přehled jednotlivých typů ozubení a následně také přehled jednotlivých poruch poškození, jejich popis, příčiny a případné možnosti jejich nápravy. V poslední části bylo provedeno zhodnocení dat naměřených vibrační chodu čtyřstupňové převodovky před vznikem poškození a při poškození.

Ozubené převody se dělí podle vzájemné polohy hřídelů, na kterých jsou umístěna ozubená kola, na čelní, kuželová a šroubová. Tyto základní druhy ozubených převodů se dále rozděluje podle jednotlivých provedení. Nejčastěji se u ozubených převodů využívá evolventní tvar zubu, jelikož změna osové vzdálenosti nemá zásadní vliv na změnu velikosti úhlové rychlosti a tento tvar splňuje i další podmínky, například výrobní. Z technologických a provozních důvodů nemůže být tvar zubu pouze evolventní a je třeba počítat s modifikacemi.

Při špatném konstrukčním návrhu nebo údržbě může v ozubených převodech docházet k jevům, které následně způsobují jejich poškození. Existuje mnoho druhů poškození ozubených převodů, která vznikají z různých důvodů. Podle [6] dochází u ozubených převodů nejčastěji k vylomení zubu. K lomu zubu dochází při nadměrném namáhání nad mez pevnosti. Druhým nejčastějším poškozením je otěr zubu, při kterém dochází k nežádoucímu úběru materiálu. Podle toho, jakým způsobem dochází k úběru, se dělí na otěr abrazivní, adhezivní a chemický. Třetí nejčastější poruchu představuje únavové vydrolování, které způsobují spojující se mikrotrhliny, jež vznikají v důsledku vysokých podpovrchových napětí. Takto poškozená ozubená kola, většinou kusové výroby, kde by bylo ekonomicky náročné zhotovení nového kusu, lze při správném technologickém postupu opravit.

Při navrhování ozubeného převodu se nejdříve využívají numerické simulace, které se mohou doplnit o výsledky z technických experimentů. Vzájemným porovnáním dat lze dosáhnout vyšší úrovně a přesnosti numerického modelu. Mezi takové technické experimenty patří vibrodiagnostika. Převodové ústrojí se upevní na testovací stav. Pohon se zajišťuje motorem a na měření energie lze použít dynamometr. Pro snímání potřebných projevů soukolí se používají příslušné sondy a snímače. Naměřené hodnoty lze vyhodnotit v časové závislosti, ale většinou je využívána frekvenční závislost, kdy se pro zpracování dat využívá FFT. Na výsledných grafech lze určit jednotlivé dominantní frekvence, které lze dostat na základě provedeného frekvenčního rozboru. Na grafech z měření před poškozením lze rozeznat především tyto dominantní frekvence. Na grafech z měření při poškození je možno vidět i další jevy, jako například postranní pásma dominantních frekvencí, která jsou způsobena poškozením zubů. Z výsledků je zároveň zřejmé, že dochází k širokopásmovému buzení, viz porovnání multispekter na Obr. 3.5 a 3.9.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HOSNEDL, Stanislav a Jaroslav KRÁTKÝ. Příručka strojního inženýra: obecné strojní součásti. Praha: Computer Press, 2000. Edice strojaře. ISBN 80-7226-202-5.
- [2] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [3] RADZEVICH, Stepan Pavlovich. Dudley's handbook of practical gear design and manufacture.: Handbook of practical gear design and manufacture. Third edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. ISBN 9781498753104.
- [4] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. Části strojů. 2. svazek. 5. přeprac. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990, 707 s. : il. ISBN 80-03-00426-8.
- [5] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Jiří DVOŘÁČEK. Základy konstruování. Vydání šesté. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2015. ISBN 978-80-7204-921-9.
- [6] JELASKA, Damir. Gears and gear drives. Chichester: Wiley, 2012. ISBN 978-1-119-94130-9.
- [7] Causes of Failure of Gears. Causes of Gear Failure. How Gear Fails? Why Gear Fails?. Bright hub engineering [online]. c2019 [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: <https://www.brighthubengineering.com/cad-autocad-reviews-tips/8437-failure-modes-in-gears-part-two/>
- [8] Gears and Types of Gears. Mechgrid [online]. c2019 [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: <http://www.mechgrid.com/gears-and-types-of-gears.html><https://gearsmechon.wordpress.com/type-of-gearing/>
- [9] Spur gears. In: Howstuffworks.com [online]. 2019 [cit. 2019-01-19]. Dostupné z: <https://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/gear2.htm>
- [10] HARTL, Martin. Konstruování strojů, převody: Přednáška 1. Brno, 2019.
- [11] MORAVEC, Vladimír. Konstrukce strojů a zařízení II.: čelní ozubená kola : teorie, výpočet, konstrukce, výroba, kontrola. Ostrava: Montanex, 2001. ISBN 80-7225-051-5.
- [12] Převody ozubenými koly. ELUC [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1904>
- [13] Steel Planetary Spur Gears. In: Alibaba [online]. 2019 [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: [https://www.alibaba.com/product-detail/Steel-Planetary-Spur-Gears\\_60687469203.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Steel-Planetary-Spur-Gears_60687469203.html)
- [14] PRÁŠIL, Ludvík. Kuželová kola se šikmými a zakřivenými zuby. Liberec, 2010. Technická univerzita v Liberci.
- [15] Failure Modes in Gears. Causes of failure of gears. Gears Failure. Bright hub engineering [online]. c2019 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z:

<https://www.brighthubengineering.com/cad-autocad-reviews-tips/8443-failure-modes-in-gear-part-one/>

- [16] Plastic Flow. Gearsmechon.wordpress [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://gearsmechon.wordpress.com/plastic-flow/>
- [17] Lubrication in Automotive Gears. Slideshare [online]. c2019 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/RAJIVRANJAN98/lubrication-in-automotive-gears-62276942>
- [18] MUKHARJI, Promita. Machinery failure analysis handbook. New York: Scitus Academics, [2016]. ISBN 168117409X. <https://www.mechgrid.com/gear-failure.html>
- [19] GOPINATH, K. a M.M. MAYURAM. *Gears: Gear failure* [online]. Madras [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: [https://nptel.ac.in/courses/112106137/pdf/2\\_6.pdf](https://nptel.ac.in/courses/112106137/pdf/2_6.pdf).
- [20] JÁGR, Jan. Měření ozubení. Praha, 2015. Bakalářská práce. České vysoké učení v Praze. Vedoucí práce Podaný Jan.
- [21] Conquering big challenges in small spaces [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.itwheartland.com/wp-content/uploads/2011/06/ITW-Heartland-Spiroid-Gears.pdf>
- [22] Broken Gear Repair: Brazing Up and Machining New Teeth [online]. 2016 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=YWaF\\_QhcxA0](https://www.youtube.com/watch?v=YWaF_QhcxA0)